



Titre: Gestion des eaux pluviales en zones côtières dans un contexte de
Title: changements climatiques

Auteur: Julia Ayombo Ndombet
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ayombo Ndombet, J. (2015). Gestion des eaux pluviales en zones côtières dans
Citation: un contexte de changements climatiques [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2025/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2025/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

GESTION DES EAUX PLUVIALES EN ZONES CÔTIÈRES DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES

JULIA AYOMBO NDOMBET

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

GESTION DES EAUX PLUVIALES EN ZONES CÔTIÈRES DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES

présenté par : AYOMBO NDOMBET Julia

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MAHDI Tew-Fik, Ph. D., président

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. KAHAWITA René, Ph. D., membre

DÉDICACE

À mes parents : Victor NDOMBET et Brigitte MABOUMBA !

REMERCIEMENTS

Pour la réalisation de ce mémoire j'adresse mes remerciements tout d'abord à la ville de Sept-Îles pour la mise à disposition des données. Ensuite, à l'École Polytechnique de Montréal et l'ensemble des professeurs directement ou indirectement liés à ce mémoire. Particulièrement, à mon directeur de recherche M. Musandji FUAMBA pour le temps alloué et les conseils prodigués ; aux membres du jury, M. Tew-Fik MAHDI et M. René KAHAWITA, pour m'avoir fait l'honneur d'avoir participé à ma présentation ; au directeur des études supérieures, M. Jean DANSEREAU, pour m'avoir accordé du temps supplémentaire. Aussi, je remercie l'ensemble des étudiants et étudiantes inscrits en recherche au département génie civil option hydraulique.

Enfin, mes remerciements s'adressent à la direction de l'École Polytechnique de Masuku pour le financement de mes études et les encouragements reçus, particulièrement à M. Gaston N'TCHAYI MBOUROU, directeur général de l'École Polytechnique de Masuku. Je remercie également ma famille et mes ami(e)s pour le soutien et les encouragements reçus.

RÉSUMÉ

Les projections climatiques prédisent une augmentation des intensités des précipitations et du niveau global de la mer, notamment dans les régions côtières. L'urgence de mettre en place des techniques d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques s'intensifie de plus en plus. Ce projet vise à apporter des solutions de gestion des eaux pluviales en zones côtières dans un contexte de changements climatiques. Les courbes IDF des pluies en climat futur sont générées à partir du modèle climatique MIROC5 via l'outil IDF_CC. Les courbes IDF obtenues permettent par la suite de produire des pluies de récurrence 5ans et de type Chicago d'une durée de 3h avec un pas de temps de 10 min.

Le logiciel SWMM5.1 est utilisé pour simuler le réseau de drainage de la ville de Sept-Îles soumis aux différentes pluies représentant le climat changeant. Les résultats obtenus confirment que le réseau, seul, est incapable de drainer les eaux pluviales du secteur à l'étude aux horizons 2045-2065 et 2080-2100. En effet, le nombre de débordements observé en climat changeant représente près de la moitié du nombre total de jonctions.

La mise en place de pratiques de gestion optimales (PGO) des eaux pluviales permet d'adapter le réseau aux changements climatiques observés en parlant des précipitations. En effet, les résultats obtenus après la mise en place des PGO de type pavés poreux, débranchement des gouttières et jardin de pluie, en climat futur, montrent un taux de variation de -79 à -59% concernant l'indice de débordements.

ABSTRACT

Climate projections predict an increase in precipitation intensity and global sea levels, especially in coastal regions. The urgency to implement method of coastal adaptation under climate change is increasingly growing. This project aims to provide storm water management in coastal areas under climate change. IDF curves under climate change are generated from the climate model MIROC5 via IDF_CC tool. The resulting IDF curves are used to produce a Chicago 5-year return period rainfall of 3hours duration with a 10 min time step.

SWMM 5.1 is used to simulate the Sept-Îles network under different rainfall representing the changing climate. The results confirm that the network is unable to drain rainwater from the study area in 2045-2065 and 2080-2100 horizons. Indeed, under climate change, the number of flooded junctions observed represent nearly half the total number of junctions.

The implementation of best management practices (BMPs) for storm water is used to adapt the network to the observed climate changes in terms of precipitation. Indeed, the results obtained after the implementation of some BMPs such as porous pavements, disconnection of gutters and rain garden in future climate, show a rate of change of -79 to -59% for the overflows index.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Définition du problème à l'étude	2
1.3 Limites de l'étude.....	3
1.4 Objectifs de recherche	3
1.5 Hypothèses	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
2.1 La modélisation des changements climatiques	5
2.1.1 La modélisation climatique	5
2.1.2 Les projections climatiques.....	8
2.2 Les précipitations dans un contexte de changements climatiques	11
2.2.1 Impacts des changements climatiques sur les précipitations	11
2.2.2 Impacts sur les courbes IDF	12
2.3 Le drainage des eaux urbaines en climat changeant	13

2.3.1	Impacts sur les réseaux de drainage	13
2.3.2	La gestion des eaux pluviales dans un contexte de changements climatiques	14
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		18
3.1	Impacts des changements climatiques en zones côtières	18
3.1.1	Choix des modèles climatiques	18
3.1.2	Pluies en climat futur.....	21
3.1.3	Mesure des impacts des changements climatiques dans une zone côtière	25
3.2	Détermination de la performance du réseau existant	26
3.2.1	Critères de performance	26
3.2.2	Niveau de service du réseau à l'étude	29
3.3	Mise en place des pratiques de gestion optimales.....	30
3.3.1	Liste des PGO disponibles	30
3.3.2	Critères de choix d'une PGO	36
3.3.3	Classement des PGO sélectionnées.....	36
3.4	Application à une étude de cas	38
3.4.1	Définition d'une zone côtière.....	39
3.4.2	Modélisation d'un réseau de drainage.....	40
3.4.3	Acquisition et traitement des données.....	43
CHAPITRE 4 EXEMPLE D'APPLICATION		46
4.1	Présentation de la zone d'étude	46
4.1.1	Présentation géopolitique	46
4.1.2	Présentation du bassin versant.....	48
4.1.3	Présentation du réseau de drainage	49
4.2	Pluies de projet	51

4.2.1	Pluie en climat actuel	52
4.2.2	Pluie en climat futur	54
4.3	Modélisation du réseau de drainage	58
4.3.1	Modélisation du bassin versant	58
4.3.2	Pré-dimensionnement par la méthode rationnelle	61
4.3.3	Modélisation dans le logiciel SWMM5.1	62
4.4	Application : gestion des eaux pluviales en climat changeant	66
4.4.1	Analyse du réseau.....	66
4.4.2	Mise en place des PGO	67
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		71
5.1	Présentation des résultats	71
5.1.1	État de service du réseau sous le climat actuel.....	71
5.1.2	État de service du réseau sous l’horizon 2045-2065	73
5.1.3	État de service du réseau sous l’horizon 2080-20100	74
5.1.4	État de service du réseau après la mise en place des PGO.....	75
5.2	Analyse des résultats	77
5.2.1	Comparaison climat actuel et climat futur sans PGO	78
5.2.2	Comparaison climat futur sans PGO et climat futur avec PGO	80
5.2.3	Comparaison climat actuel et climat futur avec PGO	84
5.3	Synthèse des résultats.....	88
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		91
BIBLIOGRAPHIE		93
ANNEXES		96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Comparaison des approches dynamique et statistique.....	6
Tableau 2-2 : Profils représentatifs les plus considérés dans les études.	7
Tableau 2-3 : Comparaison entre SRES et RCP.	8
Tableau 2-4 : Majorations recommandées pour les diverses régions du Québec à l'horizon 2050.	12
Tableau 2-5 : Classification des PGO par groupe.	16
Tableau 3-1 : Liste des modèles utilisés dans l'outil IDF_CC.	19
Tableau 3-2 : Changements prévus de la température moyenne globale et du niveau moyen de la mer pour le moyen et la fin du XXI ^e siècle par rapport à la période de référence de 1986 à 2005.....	22
Tableau 3-3 : Niveau moyen de la mer considéré pour chacun des RCP.	26
Tableau 3-4 : Définition des critères de performance.	29
Tableau 3-5 : PGO par type de zones côtières.	38
Tableau 3-6 : Coûts de quelques PGO.	38
Tableau 3-7 : Exemple de limites de la zone côtière.....	40
Tableau 3-8 : Coefficient de ruissellement en fonction de l'occupation du territoire	42
Tableau 4-1 : Intensité en fonction du temps de la pluie en climat actuel.	53
Tableau 4-2 : Caractéristiques des courbes IDF en climat futur avec T = 5ans.....	54
Tableau 4-3 : Noms des pluies correspondantes à chacun des scénarios RCP.	54
Tableau 4-4 : Coefficient de ruissellement relatif aux différentes zones rencontrées.	60
Tableau 4-5 : Paramètres de l'équation de Green-Ampt.	60
Tableau 4-6 : Critères d'implantation des PGO.....	69
Tableau 4-7 : Coûts moyens par PGO mises en place.	69
Tableau 5-1 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R	71

Tableau 5-2 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.....	72
Tableau 5-3 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R	73
Tableau 5-4 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.....	73
Tableau 5-5 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R	74
Tableau 5-6 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.....	74
Tableau 5-7 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R	75
Tableau 5-8 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.....	76
Tableau 5-9 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R	77
Tableau 5-10 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.....	77
Tableau 5-11 : Différence des valeurs à l'horizon 2045-2065 et celles du climat actuel.	78
Tableau 5-12 : Pourcentage d'augmentation des indices de performance.....	79
Tableau 5-13 : Différence des valeurs à l'horizon 2080-2100 et celles du climat actuel.	80
Tableau 5-14 : Pourcentage d'augmentation des indices de performance.....	80
Tableau 5-15 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2045-2065.	82
Tableau 5-16 : Comparaison de l'indice de ruissellement avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2045-2065.	82
Tableau 5-17 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2080-2100.	83
Tableau 5-18 : Comparaison de l'indice de ruissellement avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2080-2100.	84
Tableau 5-19 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R (climat actuel et horizon 2045-2065 avec PGO).....	85
Tableau 5-20 : Comparaison de l'indice de ruissellement (climat actuel et horizon 2045-2065 avec PGO).....	85

Tableau 5-21 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R (climat actuel et horizon 2080-2100 avec PGO).....	87
Tableau 5-22 : Comparaison de l'indice de ruissellement (climat actuel et horizon 2080-2100 avec PGO).....	87
Tableau 5-23 : Synthèse des indices de performance sous le RCP8.5.	88
Tableau 5-24 : Taux de variation des indices en comparaison au climat actuel.	88
Tableau 5-25 : Différences entre hauteur des précipitations en climat actuel et futur.	89

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres et les océans, de 1850 à 2012.	9
Figure 2-2 : Évolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012.	9
Figure 2-3 : Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées.	10
Figure 2-4 : Évolution de la température moyenne en surface entre 1986-2005 et 2081-2100.	10
Figure 2-5 : Évolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100.	11
Figure 2-6 : Interface de l’outil IDF_CC.	13
Figure 3-1 : Colonne de lecture de l'indice d'inondation.....	27
Figure 3-2 : Ligne de lecture de la lame d'eau ruisselée et des pertes par infiltration.	28
Figure 3-3 : Colonne de lecture du débit de pointe à l'exutoire.	28
Figure 3-4 : Exemple d'un système de bio-rétention (coupe transversale).	32
Figure 3-5 : Exemple d'une toiture verte extensive.	34
Figure 3-6 : Exemple d'une toiture verte intensive.	34
Figure 3-7 : Découpage de la zone côtière au Nouveau-Brunswick.	39
Figure 3-8 : Schéma général de la méthodologie.	45
Figure 4-1 : Secteurs de la ville de Sept-Îles.....	47
Figure 4-2 : Présentation de la zone d'étude.....	47
Figure 4-3 : Bassin versant à l'étude.	48
Figure 4-4 : Réseau à l'étude.	50
Figure 4-5 : Position de la station Sept-Îles A par rapport au centre-ville.....	51
Figure 4-6 : Caractéristiques de la station Sept-Îles A.....	52
Figure 4-7 : Hyétoqramme de la pluie en climat actuel.	53
Figure 4-8 : Hyétoqramme de TS2.....	55

Figure 4-9 : Hyétogramme de TS3.....	55
Figure 4-10 : Hyétogramme de TS4.....	56
Figure 4-11 : Hyétogramme de TS5.....	56
Figure 4-12 : Hyétogramme de TS6.....	57
Figure 4-13 : Hyétogramme de TS7.....	57
Figure 4-14 : Subdivision du bassin à l'étude en sous bassins.	59
Figure 4-15 : Modélisation du réseau dans SWMM5.1.	64
Figure 4-16 : Jonction J75 avec ses propriétés.....	65
Figure 4-17 : Conduite C12 avec ses propriétés.	65
Figure 4-18 : Exutoire Out3 avec ses propriétés.	66
Figure 4-19 : Sous bassin S379 soumis à la pluie TS7.	67
Figure 4-20 : Implantation des PGO.	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CCmaC : Centre Canadien de la modélisation et de l'analyse Climatique

CNRM : Centre National de Recherche Météorologique

GTR : Gestion en Temps Réel

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (en anglais IPCC)

GT1 : Groupe de Travail 1 (en anglais : WG1)

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

IDF_CC : IDF under climate change

LAM : Limited Area Models (modèles à aire limitée)

MCCG : Modèles Couplés Climatiques Globaux

MCG : Modèle de Circulation Générale

MCGA : Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère

MDDEFP : Ministère du Développement Durable, Environnement, Faune et Parcs

MSD : Modèles Statiques Dynamiques

MRC : Modèle Régional de Climat

PGO : Pratiques de Gestion Optimale (BMP en anglais)

RCP : Profils représentatifs de l'évolution de concentration

RCSCC : Réseau Canadien des Scénarios de Changements Climatiques

SRES : Rapport Spécial sur les Scénarios d'Émission

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – mise en comparaison de l’outil IDF_CC	96
Annexe B – présentation de l’outil IDF_CC	98
Annexe C – les différents types de pluies de projet	101

CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

Les zones côtières sont généralement définies comme des espaces ou régions servant d'interface ou de transition entre la terre et la mer, y compris les grands lacs. Ces zones représentent un lieu de concentration humaine occupé par près de 60% de la population mondiale. En effet, qu'elles soient des zones humides ou estuariennes, les côtes sableuses ou rocheuses ou des marais maritimes, les régions côtières présentent des intérêts tant écologiques, paysagers qu'économiques. Pour plusieurs pays, elles possèdent un enjeu politique, économique et social. Toutefois, ces zones sont exposées aux phénomènes côtiers tels que l'érosion côtière, les inondations etc. Leur topographie (la majorité de ces zones ont des élévations proches du niveau de la mer) est l'un des facteurs qui les prédisposent de devenir sujettes auxdits phénomènes.

Les différentes études qui démontrent que le climat futur évolue vers un réchauffement global de la planète se concluent majoritairement par une observation de l'augmentation de la température globale. Notamment, M. Will Stephen indique, dans le rapport de la commission climat du gouvernement australien, que les preuves du réchauffement de la planète écartaient toute possibilité de scepticisme et que la dernière décennie représente la période la plus chaude jamais enregistrée (ANU-CCI 2011). De plus, les rapports de bilan des connaissances sur les changements climatiques du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, IPCC en anglais), démontrent avec insistance l'hypothèse d'une hausse générale de la température à l'échelle du globe (GIEC-GT1 2001 ; GIEC-GT1 2013). Cette augmentation de la température globale est l'un des facteurs qui induisent d'autres conséquences telles que la hausse du niveau de la mer, l'intensification des précipitations en zones humides, etc.

Plusieurs zones sont affectées par les conséquences des changements climatiques, particulièrement les zones côtières. En effet, les zones côtières sont très vulnérables face aux conséquences des changements climatiques d'après leur prédisposition naturelle. En exemple, on relève le Québec maritime dont les populations riveraines du long du Saint-Laurent sont soumises à cette vulnérabilité (Savard et Bourque 2010).

Face aux précipitations plus intenses, on observe des débits de ruissellement plus grands qui induisent un dépassement de la capacité hydraulique des réseaux de drainage des eaux urbaines.

En effet, le dimensionnement des systèmes hydrauliques basé sur l'utilisation des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) n'est plus valable dans un contexte de changements climatiques. Ainsi, la mise en place de modèles prévisionnels incluant les écarts climatiques à venir servant d'intrant pour les logiciels de dimensionnement des systèmes hydrauliques est l'un des défis à relever par les hydrauliciens.

La présente étude, s'intéresse particulièrement aux impacts hydrologiques causés par les changements climatiques en zones côtières. Elle est axée principalement sur le développement des solutions hydrauliques qui répondront aux conséquences des changements climatiques en vue d'une gestion durable et efficace des eaux pluviales en milieu urbain dans les zones côtières. Le choix d'utilisation des pratiques de gestion des eaux (PGO) est retenu comme solution d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques. En effet, les PGO présentent des propriétés intéressantes qui sont favorables au drainage des eaux en milieu urbain et sont souvent utilisées pour secourir les réseaux de drainage. Toutefois, le choix des PGO adéquates à une zone spécifique, ainsi que leur mise en place font l'objet de plusieurs études.

Le présent rapport est structuré en cinq chapitres : le premier chapitre, en plus de présenter le contexte de l'étude, définit le problème à l'étude, les limitations, les objectifs et hypothèses de ce projet. Le deuxième chapitre traite de la revue de la littérature en lien avec cette étude. Le troisième chapitre présente les méthodes et outils de recherche utilisés pour la réalisation de ce projet. Le quatrième chapitre présente l'application de la méthodologie de recherche à la ville de Sept-Îles au Québec. Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats obtenus ainsi qu'une discussion autour de ces résultats. Une conclusion est également présentée pour clore ce rapport.

1.2 Définition du problème à l'étude

Selon les résultats des différents chercheurs cités précédemment, les changements climatiques pourraient engendrer une augmentation des fréquences et des intensités des précipitations en zones humides. En effet, plusieurs groupes de chercheurs (comme le GIEC en exemple) mentionnent une augmentation des températures qui pourrait engendrer différents phénomènes tels l'intensification des précipitations, la hausse progressive du niveau de la mer, etc. Ces différents phénomènes ont des effets néfastes dans les zones urbaines, particulièrement en zones côtières. Parmi ces effets, une plus forte récurrence des événements responsables d'inondation est observée. Ainsi, plusieurs

municipalités font face aux inondations qui deviendront plus récurrentes et de forte ampleur avec les changements climatiques.

La question de savoir comment gérer les eaux pluviales en zones côtières face aux changements climatiques devient nécessaire à résoudre.

En somme, le problème à l'étude est défini par un risque d'inondation qui est le résultat d'une augmentation des intensités de précipitations. Deux cas spécifiques aux zones côtières sont retenus dans cette étude :

Cas n1 : inondation causée par une augmentation des intensités de précipitations mais le niveau de la mer reste le même.

Cas n2 : inondation causée par une augmentation des intensités de précipitations et une augmentation du niveau de la mer est observée.

1.3 Limites de l'étude

Cette étude est réalisée en considérant plusieurs limites telles qu'énumérées ci-après.

- La qualité des eaux pluviales ne sera pas traitée dans la présente étude. Seul l'aspect quantitatif sera analysé dans cette étude. En effet, la méthodologie proposée pour adapter les zones côtières aux changements climatiques considère uniquement l'aspect quantitatif des impacts des changements climatiques en zones côtières.
- Le dimensionnement des PGO n'est pas traité dans la présente étude. Bien que les PGO soient l'une des solutions retenues pour adapter les zones côtières aux changements climatiques, leur dimensionnement ne fait pas partie des objectifs de cette étude.

1.4 Objectifs de recherche

Le principal objectif de ce projet est de proposer des mesures d'adaptation des zones côtières aux impacts des changements climatiques en matière de gestion des eaux pluviales. Les objectifs secondaires qui en découlent sont :

- Déterminer les impacts des changements climatiques en zone côtière
- Déterminer la performance du réseau existant

- Montrer la faisabilité de la mise en place des pratiques de gestion optimales comme mesures d'adaptation aux impacts des changements climatiques
- Application à une étude de cas

1.5 Hypothèses

Pour la réalisation de cette étude, plusieurs hypothèses sont considérées. Notamment, pour les conditions des changements climatiques en climat futur. D'abord, les périodes futures sont prises par intervalles de 20 ans. Cette hypothèse est mise en place par analogie aux périodes futures utilisées par le GIEC dans leur cinquième rapport. En effet, les résultats de simulations des changements climatiques diffusés dans ce rapport considèrent deux principales périodes (2046-2065 et 2081-2100) pour le climat futur. Aussi, la génération des courbes IDF en climat changeant à partir de l'outil IDF_CC requiert que la période future soit composée d'un minimum de 20 années. Toutefois, il est utile de spécifier que l'outil IDF_CC décompte le nombre d'années en faisant une soustraction des années sélectionnées. Comme exemple, pour un choix de 2046-2065 l'outil IDF_CC estime que le nombre d'années étudiées est de $2065 - 2046 = 19$ années. Ainsi, les périodes futures d'étude considérées sont 2045-2065 et 2080-2100.

De plus, la première période (2045-2065) représente le cas où les débordements sont uniquement causés par une augmentation des intensités de précipitations. Bien que le niveau global de la mer, prévu pour cette période, augmentera probablement (0,2m en moyenne), au niveau régional cette augmentation ne présente pas un impact au réseau de drainage. En effet, pour le réseau à l'étude, la côte du radier inférieur des exutoires est à un minimum de 0,25m. Dans ce cas le niveau de la mer ne peut être responsable des débordements observés.

Enfin, pour la deuxième période future (2080-2100), le niveau de la mer proche du site d'étude est supposé à 0,4m. Basée sur l'évolution du niveau global de la mer pour la période 2081-2100, cette hypothèse est formulée pour permettre d'évaluer le comportement du réseau de drainage en cas de submersion de l'exutoire.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans le présent chapitre, la revue de la littérature en rapport avec cette étude est présentée. La section 2.1 permet de montrer les différentes études qui traitent de la modélisation des changements climatiques. Les projections climatiques et les modèles climatiques y sont présentés. La section 2.2 présente l'évolution des précipitations avec les changements climatiques, les impacts des changements climatiques sur les précipitations ainsi que leurs répercussions sur les courbes IDF. La section 2.3 renvoie aux études qui traitent du drainage des eaux urbaines en climat changeant. Les impacts sur les réseaux de drainage y sont énumérés ainsi que les techniques de gestion proposées par la littérature.

2.1 La modélisation des changements climatiques

La modélisation des changements climatiques est basée sur l'utilisation des modèles climatiques et des scénarios des changements climatiques. Elle permet d'estimer des prévisions ou tendances climatiques pour le futur. Plusieurs groupes de chercheurs se sont penchés sur la problématique des changements climatiques tant pour le développement des modèles climatiques afin d'améliorer la qualité des projections obtenues (Prudhomme et al. 2002 ; CNRM 2010 ; IPCC 2013 ; CCmaC 2014) que pour l'utilisation des résultats des modèles climatiques (Mailhot et al. 2007 ; Mailhot et al. 2008a ; IPCC 2013 ; Mailhot et al. 2014). La section 2.1.1 présente les éléments clés de la modélisation climatique. La section 2.1.2 permet de présenter les projections obtenues à partir de la modélisation du climat futur.

2.1.1 La modélisation climatique

Il existe deux principaux groupes de modèles climatiques : les modèles de circulation globale (MCG) et les modèles régionaux de climat (MRC). Les MCG permettent de réaliser une simulation globale du climat terrestre et les MRC permettent de réaliser une simulation locale ou régionale du climat. En effet, les MCG représentent des outils indispensables pour l'estimation du climat sur l'ensemble de la planète qui sont calés à l'aide des données disponibles sur les climats anciens (Bizec 2006). Ils ont été développés pour déterminer l'effet de l'augmentation des gaz à effets de serres (GES) sur l'évolution du climat au cours du XXIème siècle.

Les MCG possèdent plusieurs avantages tels que la prédiction de l'évolution globale du réchauffement de la planète, l'évolution de l'augmentation du niveau moyen global de la mer. En effet, ces modèles favorisent l'interprétation de la redistribution des éléments physiques, radiatifs ou thermodynamiques associés aux changements de phase de l'eau tels que la chaleur et l'humidité (Beniston 2009). Toutefois, les MCG possèdent plusieurs inconvénients tels que la représentation adéquate des phénomènes climatiques régionaux ou locaux compte tenu de leur faible résolution spatiale, la génération des incertitudes dues à leur structure interne (GIEC-GT1 2001; Prudhomme et al. 2002). Ainsi, les MRC ont été développés afin de dépasser les limites des MCG.

En effet, le MRC possèdent une résolution plus fine qui leur permet d'effectuer les études climatiques régionales ou locales (Beniston 2009). Il existe plusieurs méthodes de développement des MRC parmi lesquelles les approches de réduction d'échelle qui peuvent être statistiques ou dynamiques (downscaling), les approches de couplages de méthodes statistiques et dynamiques, les méthodes d'auto imbrication des MRC (Prudhomme et al. 2002 ; Beniston 2009). Le Tableau 2-1 présente une comparaison entre l'approche de réduction d'échelle dynamique et celle statistique.

Tableau 2-1 : Comparaison des approches dynamique et statistique. (source : Sirastav et al. 2015)

Critères	Approche Dynamique	Approche Statistique
Temps de calcul	Très lent	Rapide
Complexité	Réalisations limitées	Réalisations multiples
Exemples	MRC, ensemble des MGC	Régression linéaire, réseau neuronal, régression Kernel

L'un des inconvénients majeurs de ces modèles est qu'ils possèdent les MCG comme conditions aux limites initiales propageant ainsi les incertitudes générées par les modèles globaux. Toutefois, les techniques d'auto imbrication permettent de réduire cette prolifération des incertitudes. Contrairement aux MRC, les MCG possèdent les scénarios de circulations atmosphériques comme conditions aux limites initiales.

Comme les modèles climatiques, les scénarios de changements climatiques peuvent être regroupés en trois principales classes référant ainsi à leur génération de développement. La première classe qui représente la première génération ne considère que les émissions des GES dans ces paramètres (classe devenue quasi inexistante). Ensuite, la seconde qui est composée des scénarios du rapport spécial sur les scénarios d'émission des GES (SRES), en plus des émissions des GES, considère les effets des aérosols sulfatés. La troisième classe est principalement composée de l'ensemble des profils représentatifs de l'évolution de concentration (RCP) et permet d'intégrer des politiques climatiques pour le XXIème siècle. Les scénarios les plus mentionnés dans la littérature sont principalement :

- Pour les SRES : A1, A1B et A2

Les scénarios de type A1 considèrent un état d'émissions des GES le plus négligeable possible, tandis que ceux de type A2, considèrent l'état d'émission des GES le plus important possible. Quant aux scénarios de type A1B, ils représentent l'état intermédiaire entre les scénarios de type A1 et A2 (Mailhot et al. 2014).

- Pour les scénarios de type RCP

Les scénarios de type RCP représentent les scénarios les plus utilisés. Ils sont représentés dans le Tableau 2-2. Notons que le profil de type RCP6.0 est quasiment équivalent au RCP4.5 (Sirastav et al. 2015). Les chiffres désignant chacun des profils expriment le changement de forçage radiatif associé aux concentrations des émissions des GES (Mailhot et al. 2014).

Une brève comparaison des scénarios de type SRES et RCP est présentée au Tableau 2-3.

Tableau 2-2 : Profils représentatifs les plus considérés dans les études. (source : GIEC-GT1 2013)

Nom du scénario	Type de scénario
RCP2.6	Scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage très bas.
RCP4.5	Scénario de stabilisation.
RCP8.5	Scénario lié aux émissions des gaz à effet de serre très élevées.

Tableau 2-3 : Comparaison entre SRES et RCP. (source : GIEC-GT1 2013)

SRES	RCP
N'intègrent pas de politiques climatiques	Intègrent les politiques climatiques
Profil décrit jusqu'en 2100	Profil décrit jusqu'en 2300
Peuvent être définis à partir de la croissance économique et de la croissance de la population mondiale	Peuvent être définis à partir des nouveaux scénarios sociaux-économiques qui sont définis en termes de défi d'adaptation et défi d'atténuation à atteindre

2.1.2 Les projections climatiques

Le cinquième rapport du GIEC présente les changements observés de l'évolution du climat au cours des trois dernières décennies. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle le climat évolue vers un réchauffement global de la planète émise dans leurs précédents rapports en montrant que les décennies plus récentes sont plus chaudes que leurs précédentes (GIEC-GT1 2001 ; WG1-IPCC 2007 ; GIEC-GT1 2013 ; IPCC 2013). Il ressort de ce rapport que la période de 1983 à 2012 est enregistrée comme étant la plus chaude période relevée dans l'hémisphère Nord à ce jour. Les Figure 2-1, Figure 2-2 et Figure 2-3 montrent les résultats des observations de l'évolution du climat au cours de la dernière décennie tel que présenté dans le cinquième rapport du GIEC. Ainsi, l'évolution des températures et des changements concernant les précipitations est explicitement montrée dans les résultats de ces observations.

Durant la période allant de 1901 à 2010, une augmentation globale de 0,19 m du niveau moyen de la mer est relevée (IPCC 2013).

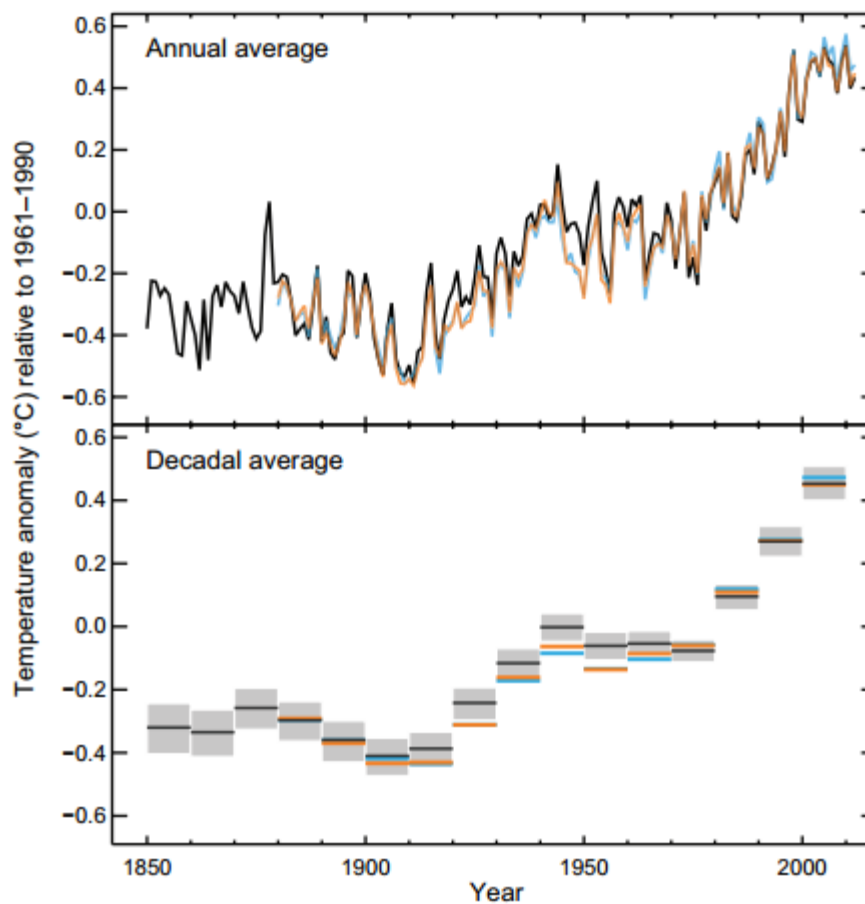


Figure 2-1 : Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres et les océans, de 1850 à 2012. (source : IPCC 2013).

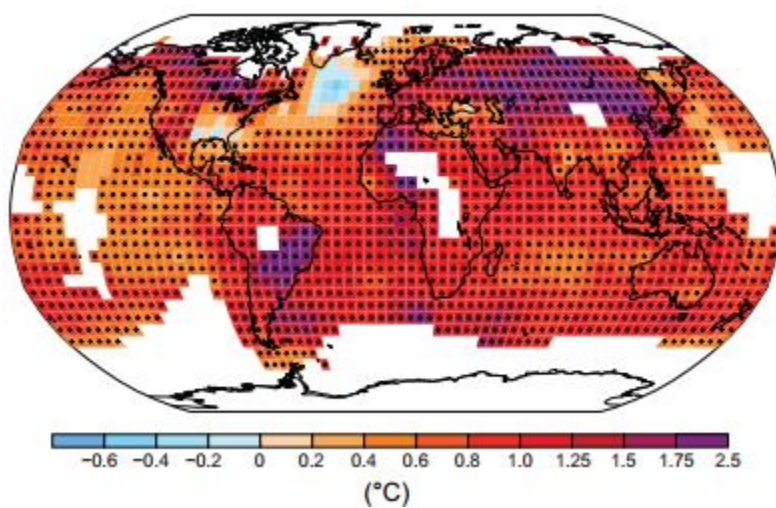


Figure 2-2 : Évolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012.
(source : IPCC 2013)

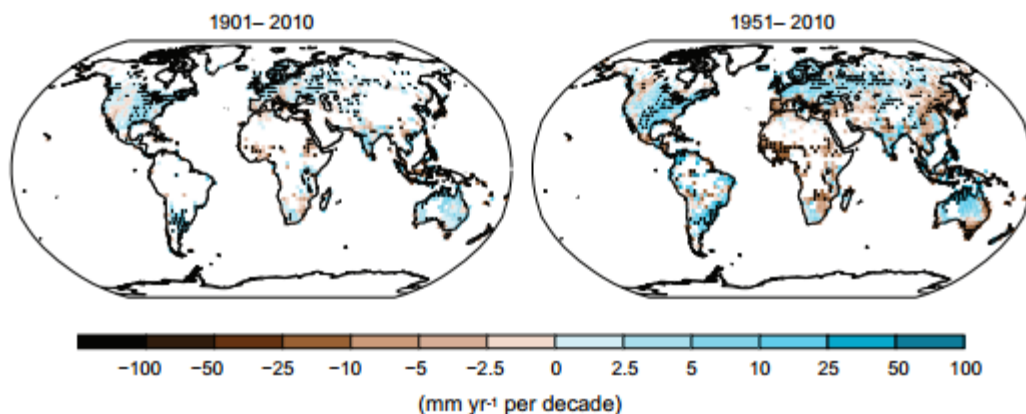


Figure 2-3 : Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées. (source : IPCC 2013)

En plus des changements observés au cours de la dernière décennie, les changements climatiques mondiaux et régionaux à venir sont discutés dans le dernier rapport du GIEC à ce jour. Ainsi, les projections futures montrent une augmentation de la température moyenne à la surface du globe en comparaison aux périodes passées (IPCC 2013). Concernant le cycle mondial de l'eau, les changements projetés en réponse au réchauffement de la planète indiquent un contraste des précipitations entre les régions humides et les régions sèches. Les résultats graphiques permettant d'observer directement ces changements en fonction de la période passée sont présentés dans la Figure 2-4 et la Figure 2-5.

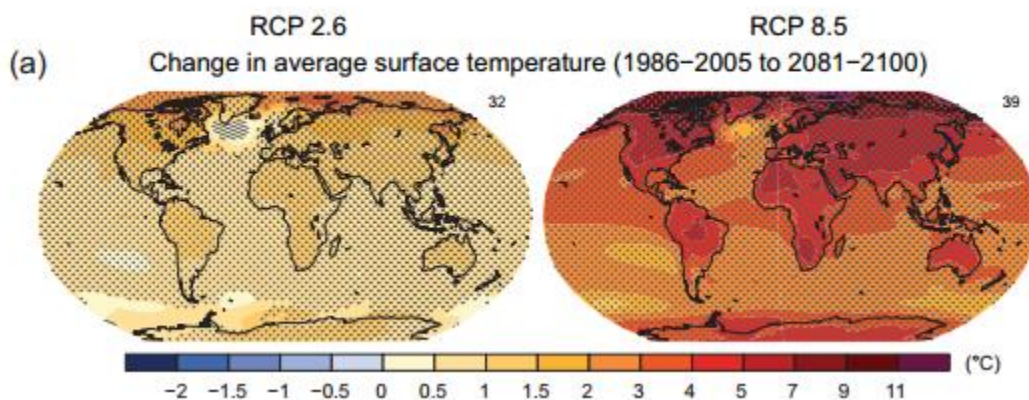


Figure 2-4 : Évolution de la température moyenne en surface entre 1986-2005 et 2081-2100. (source : IPCC 2013)

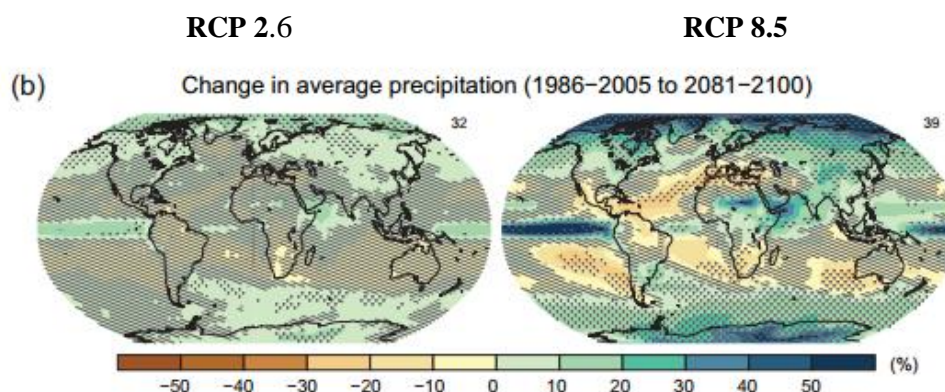


Figure 2-5 : Évolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100.

(source : IPCC 2013)

2.2 Les précipitations dans un contexte de changements climatiques

L'évolution des précipitations dans un contexte de changements climatiques est présentée dans la présente section. Les impacts des changements climatiques tant sur les précipitations que sur les courbes Intensité-Durée-Fréquence (courbe IDF) sont discutés dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Impacts des changements climatiques sur les précipitations

Comme démontré dans les résultats des rapports du GIEC, les impacts des changements climatiques sur les précipitations sont caractérisés par une augmentation probable de la moyenne annuelle des précipitations, une probable augmentation des intensités et des fréquences des épisodes de précipitations extrêmes (IPCC 2013). En effet, plusieurs études citées par Mailhot et al. (2014) indiquent que les intensités des épisodes de précipitations extrêmes augmenteront probablement plus rapidement que les intensités moyennes. Une explication appuyant ce phénomène est donnée par Mailhot et al. (2014) en se basant sur les fonctions de contrôles des intensités moyennes et des épisodes des pluies extrêmes.

La hausse projetée des intensités et des fréquences des précipitations (extrêmes ou moyenne) ne permet plus l'utilisation des courbes IDF dans leur forme de base dont la conception est réalisée par l'analyse fréquentielle des événements extrêmes passés. Ainsi, il devient primordial de revoir les éléments de base importants à la conception de ces courbes. La section 2.2.2 présente les différentes méthodes de mise à jour des courbes IDF dans un climat changeant.

2.2.2 Impacts sur les courbes IDF

Dans un contexte de changements climatiques, l'utilisation des courbes IDF développées à partir des événements extrêmes passés devient désuète. En effet, la méthodologie de mise en place des courbes IDF suppose que les données météorologiques sur lesquelles elles sont basées restent stationnaires. Cette hypothèse de base est réfutée dans un contexte de changements climatiques compte tenu des impacts de ces derniers sur les précipitations. Pour résoudre ce problème, certains auteurs tel que Prudhomme et al. (2002) recommande la prise en compte de l'évolution du climat dans les modèles hydrologiques.

Plusieurs auteurs proposent différentes méthodes de mise à jour des courbes IDF dans un climat changeant. En exemple, Mailhot et al. (2007) ont proposé des coefficients correcteurs des courbes IDF pour les régions du Sud du Québec. Aussi, Mailhot et al (2014) proposent une mise à jour des courbes IDF utilisées par le ministère des transports du Québec (MTQ) dans leur étude qui porte sur les recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes IDF aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec. Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 2-4. Pour la délimitation des régions, le lecteur est invité à consulter la référence.

Tableau 2-4 : Majorations recommandées pour les diverses régions du Québec à l'horizon 2050.
(source : Mailhot et al. 2014)

Région	Augmentation recommandée
A - Région au nord du 55° N	18%
B - Région comprise entre le 51° N et le 55° N	18%
C - Estuaire du St-Laurent	18%
D - Région ouest du Québec au sud du 51° N)	18%
E - Région sud du Québec	20%

Une autre étude qui peut être citée est celle réalisée par Sirastav et al. (2015). En effet, ces auteurs ont développé un outil de génération des courbes IDF en climat changeant (outil IDF_CC). Cet outil permet de générer les courbes IDF sous l'influence des changements climatiques pour l'ensemble des régions du Canada possédant une station de mesure enregistrée par Environnement Canada. De plus, il est possible de créer une station à partir de laquelle l'outil générera les courbes

IDF désirées et cet outil est gratuitement disponible sur le leur site web. La Figure 2-6 présente l'interface de l'outil IDF_CC qui permet de présenter la station du site étudié.

Figure 2-6 : Interface de l'outil IDF_CC.

2.3 Le drainage des eaux urbaines en climat changeant

Avec les impacts des changements climatiques sur les précipitations et les courbes IDF, le drainage des eaux urbaines en climat changeant constitue une problématique à laquelle fait face plusieurs municipalités. Cette section montre l'état des connaissances sur la gestion des eaux urbaines en climat changeant. Ainsi, la section 2.3.1 présente les études qui traitent des impacts sur les réseaux de drainage. La section 2.3.2 présente l'état des connaissances sur la gestion des eaux pluviales dans un contexte de changements climatiques.

2.3.1 Impacts sur les réseaux de drainage

Avec les changements climatiques, la capacité des réseaux de drainage est dépassée lors d'événements extrêmes. En effet, avec l'augmentation des intensités et des fréquences des événements extrêmes, l'observation de débordements des réseaux de drainage est constatée. Le

principe de dimensionnement des réseaux de drainage basé sur l'utilisation des courbes IDF peut être mis en cause dans ce cas.

Une des méthodes de mesures des impacts des changements climatiques sur les réseaux de drainage est de déterminer la performance desdits réseaux face au climat changeant. La performance hydraulique des réseaux peut être déterminée à partir de la fréquence des observations de débordements (Mailhot et al. 2008b). Aussi, Daynou et Fuamba (2007) présentent trois types d'analyses pour déterminer la performance hydraulique d'un réseau de drainage qui est fonction de la vitesse maximale d'écoulement en conduite, du débit de ruissellement et du volume total d'inondation. Dans cette étude, la performance est aussi définie par le nombre de débordements durant une année.

Bennis et al. (2003) proposent une équation qui permet de calculer l'indice de la performance hydraulique (HPI) en fonction de la hauteur maximale de surcharge dans le regard et de la profondeur d'enfouissement de la conduite.

Vidil (2012) évalue la performance d'un réseau en fonction des indices de performance définis selon le type de réseau de drainage. Selon cette étude, pour les réseaux de drainage de type unitaire, quatre indices sont définis : indice d'infiltration, indice d'inondation, indice usure et indice de surverse. Pour les réseaux de type pluvial, trois indices sont définis : indice de ruissellement, indice d'infiltration et indice de débit de pointe. Ces différents indices sont évalués par l'analyse des résultats de simulation générés par le logiciel SWMM5.0.

2.3.2 La gestion des eaux pluviales dans un contexte de changements climatiques

Dans la littérature, il existe un large éventail des modèles qui traitent de la modélisation des systèmes de drainage. Michel et al. (2007) ont réalisé un bilan de connaissances sur la modélisation de la gestion intégrée de l'eau afin d'identifier les besoins pour la recherche, sept des soixante-cinq modèles présentés ont été évalués.

Pour la gestion des eaux pluviales dans un contexte de changements climatiques, différents auteurs ont étudié la mise en place des mesures d'adaptation desdits réseaux aux changements climatiques. En exemple Vidil (2012) évalue la performance des secteurs urbains en matière de gestion des eaux usées suite à l'intégration de mesure d'adaptation aux changements climatiques. Aussi, Mailhot et

al (2008b) ont traité de la conception et de la planification des infrastructures de drainage urbain dans un contexte de changements climatiques.

D'autres auteurs ont évalué les différentes mesures d'adaptation qui existent et qui représentent les plus utilisées en matière gestion des eaux pluviales. En exemple, Mailhot et al (2008a) ont présenté une analyse critique des mesures les plus utilisées au Québec en présentant leurs avantages et leurs inconvénients. Aussi, Géhéniau (2014) a évalué la performance de deux PGO (jardin de pluie et toit vert) en climat nordique par un suivi expérimental.

Ainsi, les différentes mesures d'adaptation qui existent peuvent être regroupées en deux grandes familles : les pratiques de gestion en temps réel (GTR) et les pratiques de gestion optimale (PGO).

➤ Pratiques de gestion en temps réel (GTR)

La GTR a pour principale finalité de contribuer à la réduction des volumes de débordements dans un bassin versant, par l'utilisation de sa capacité maximale de stockage. En effet, elle a pour principe d'assurer un meilleur fonctionnement du système de drainage par l'utilisation de sa capacité hydraulique maximale en stockant entièrement ou partiellement les eaux ruisselées dans le but de réduire les volumes de débordement (Field et al. 2004).

Elle consiste à actionner les vannes et autres éléments constitutifs du réseau pour maximiser le remplissage des vides relevés dans le réseau hydraulique durant un épisode de pluie. Son principal inconvénient réside dans le fait que, pour un épisode de pluie donné, si le volume total de débordement est supérieur au volume total des vides dans le réseau alors la pratique rencontre des limites. En effet, bien que le volume des vides soit comblé, les débordements seront toujours observés. Une des recommandations visant à dépasser cet inconvénient majeur, consiste à l'associer aux pratiques de gestion optimale.

➤ Pratiques de gestion optimale (PGO)

Le guide de gestion des eaux pluviales disponible sur le site du Ministère du Développement Durable, Environnement, Faune et Parcs (MDDEFP 2010) présente un résumé des PGO dans lequel différentes classifications des PGO sont proposées. Aussi, ce guide présente les critères qui influencent le choix d'une PGO. Il en ressort alors que le choix d'une PGO est généralement influencé par : les différentes contraintes physiques ; le type de plan du cours d'eau récepteur ; la source de pollution et le pourcentage de dépollution visé ; les objectifs de contrôles divers et de

protection contre les inondations. Le Tableau 2-5 présente l'une des classification des PGO proposées par le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP 2010).

Tableau 2-5 : Classification des PGO par groupe. (source : MDDEFP 2010)

Groupe	PGO	Description
Bassins de rétention	Bassin sec	Un bassin sec est conçu pour recevoir en temps de pluie les eaux de ruissellement pour certaines gammes de débits; règle générale, il se vide sur une période relativement courte et demeure sec lorsqu'il n'y a pas de précipitation.
	Bassin sec avec retenue prolongée	La retenue des eaux pour les événements fréquents (contrôle qualitatif) peut être prolongée (entre 24 et 48 heures) puisqu'il a été démontré que le traitement pouvait ainsi être amélioré.
	Bassin avec retenue permanente	Bassin qui maintient une retenue permanente d'eau et qui effectue les différents contrôles avec une augmentation temporaire de la retenue lors de précipitations. Globalement, il a été démontré que ce type de bassin permettait d'avoir un meilleur rendement pour le contrôle qualitatif qu'un bassin sec.
Marais artificiels	Marais peu profond	Marais qui effectue un contrôle qualitatif avec différentes cellules de faibles profondeurs.
	Marais avec retenue prolongée	Marais qui effectue un contrôle qualitatif accentué avec une retenue prolongée des eaux de ruissellement.
	Système hybride bassin/marais	Système où un bassin avec une retenue permanente est implanté en amont du marais artificiel.
Systèmes avec végétation	Fossé engazonné sec	Fossé ou dépression conçu pour retenir temporairement les eaux et promouvoir l'infiltration dans le sol.
	Fossé engazonné avec retenue permanente	Fossé ou dépression avec retenue permanente et végétation spécifique (marais) conçu pour retenir temporairement les eaux et promouvoir l'infiltration dans le sol.
	Fossé engazonné avec biofiltration	Fossé ou dépression conçu pour retenir temporairement les eaux et promouvoir l'infiltration dans le sol, avec la mise en place de matériaux et de végétation favorisant une biofiltration.
	Bande de végétation filtrante (avec ou sans biofiltration)	Surfaces gazonnées avec des pentes et des dimensions appropriées, conçues pour traiter un écoulement de surface en nappe et éliminer certains polluants par filtration et infiltration.
Systèmes avec infiltration	Bassin d'infiltration	Dépression de surface qui permet de stocker le ruissellement pour favoriser par la suite l'infiltration, partielle ou totale, dans le sol.
	Tranchée d'infiltration	Pratique par laquelle les eaux de ruissellement sont traitées dans les vides d'un volume de pierre nette ou à l'intérieur d'une chambre avant d'être infiltrées en tout ou en partie.
	Pavé ou pavage poreux	L'utilisation de pavé en béton poreux ou d'asphalte poreux permet l'infiltration d'une certaine partie du ruissellement.
Systèmes de filtration	Filtre à sable de surface	Pratiques de filtration qui traitent les eaux de ruissellement en décantant les particules de plus grandes dimensions dans une chambre à sédiments, et qui filtrent ensuite à travers un filtre à sable.
	Filtre à sable souterrain	Pratiques de filtration qui traitent en réseaux les eaux de ruissellement en décantant les particules de plus grandes dimensions dans une chambre à sédiments, et qui filtrent ensuite à travers un filtre à sable.
	Filtre à sable en périphérie	Filtre qui comprend une chambre à sédiment peu profonde et un lit de filtre à sable en parallèle. Peut être utilisé en périphérie des stationnements.
Autres techniques	Mécanismes hydrodynamiques à vortex	Différents équipements permettant la séparation des matières en suspension par un processus hydrodynamique qui crée un vortex. Plusieurs modèles commerciaux existent.
	Séparateurs d'huile, graisse et sédiments	Différents équipements permettant l'enlèvement d'un certain pourcentage de polluants par la capture des débris et une décantation par gravité.

Toutefois, une adoption des stratégies d'adaptation, modifiables en fonction de l'évolution de l'amélioration des connaissances concernant les changements climatiques et du progrès technologiques en matière de drainage urbain, est proposée par WG1-IPCC (2007). De plus, plusieurs auteurs affirment que les PGO pourront aider les réseaux de drainage urbain dans un contexte de changement climatiques en vue de leur capacité à assurer la gestion des débits supplémentaires engendrés par les dits changements (Mailhot et al. 2008b ; Fuamba et al. 2010 ; Fuamba 2011). Leur choix et mise en place se base sur la définition de certains critères. Ces derniers dépendent fortement des objectifs de gestion à atteindre. Comme l'ont montré Fuamba et al (2010), l'infiltration d'une grande part de l'intensité des petites pluies, la réduction du débit à l'exutoire et l'amélioration de la qualité des rejets constituent des actions à mettre en place afin d'atteindre les objectifs de gestion tels que la préservation du cycle de l'eau, la réduction des inondations et la réduction des impacts sur le milieu récepteur. Aussi, le choix des PGO est fortement lié à la zone d'étude. Ce qui implique une difficulté à mettre en place une réglementation en matière de mesures d'adaptation aux changements climatiques (Mailhot et al. 2008b).

De plus, Mailhot et al. (2008a) ont proposé une méthodologie d'analyse des PGO de type contrôle à la source en matière de gestion des eaux pluviales d'un secteur urbain. Dans leur étude, les auteurs proposent des tableaux comparatifs de six PGO pour lesquelles une présentation exhaustive est réalisée. Il en découle sept tableaux dont les critères de comparaison varient des contraintes liées au site aux risques encourus en passant par les mesures d'entretien et leur coût.

Par ailleurs, Fuamba et Kanyinda (2014) présente les critères de conception des PGO en évaluant les coûts d'installation et d'entretien des PGO étudiées.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre traite des méthodes et outils utilisés pour la réalisation des objectifs de ce projet. La section 3.1 présente la méthode utilisée pour déterminer les impacts des changements climatiques en zones côtières. Les critères de choix d'un modèle climatique et les pluies en climat futur sont déterminés. La section 3.2 présente la méthode de détermination de la performance d'un réseau de drainage. Les critères de mesure de performance y sont discutés ainsi que l'évaluation du niveau de service du réseau. La section 3.3 permet de développer les PGO utilisées pour assurer un maintien du niveau de service des réseaux de drainage en zones côtières. La dernière section (section 3.4) traite l'application à une étude de cas. Une définition du terme zone côtière au sens de ce projet y est présentée afin de justifier le choix de la zone d'étude. La méthode et outils de traitement des données reçues sont également discutés.

3.1 Impacts des changements climatiques en zones côtières

Les impacts des changements climatiques en zones côtières se caractérisent principalement par une augmentation des intensités des précipitations et une augmentation du niveau de la mer, entraînant ainsi des débordements des réseaux de drainage. Pour déterminer ces débordements, il faut au préalable déterminer les pluies responsables desdits débordements : les pluies en climat futur influencées par les changements climatiques. La détermination de ces pluies est réalisée principalement à l'aide de l'outil de calcul des courbes IDF sous un climat changeant développé par l'université Western Ontario. Cet outil se base sur les résultats des modèles climatiques pour générer les courbes IDF futures, et propose une large gamme de modèles climatiques. Les sous-sections suivantes permettent de déterminer les critères de choix du modèle climatique utilisé et la méthode de génération des pluies en climat changeant.

3.1.1 Choix des modèles climatiques

L'outil IDF_CC propose une gamme de modèles climatiques constituée de 22 modèles MCG sélectionnés parmi les 41 modèles développés par différents centres de recherche (IPCC 2013). Ces modèles ont été retenus parce qu'ils simulent le climat futur avec les trois scénarios de changements climatiques de type RCP (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). L'outil attribue un score de compétence à chacun des 22 modèles de sorte que plus le score tend vers zéro, plus l'outil est

meilleur (Sirastav et al. 2015). Ainsi, le choix du modèle climatique s'est porté sur le modèle MIROC5 qui possède le plus petit score de compétence. Le Tableau 3-1 présente les 22 modèles disponibles dans l'outil pour la génération des courbes IDF.

Tableau 3-1 : Liste des modèles utilisés dans l'outil IDF_CC.

Numéro	Modèle	Skill score	Auteur & Pays
1	MIROC5	1.11	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
2	MPI-ESM-LR	1.27	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
3	MPI-ESM-MR	1.37	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
4	CESM1-CAM5	1.70	National Center for Atmospheric Research, USA
5	MRI-CGCM3	1.73	Meteorological Research Institute, Japan
6	CCSM4	1.74	National Center for Atmospheric Research, USA
7	CNRM-CM5	1.76	Centre National de Recherches météorologiques and Centre Européen de formation Avancée en Calcul Scientifique, France
8	MIROC-ESM	1.93	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
9	CanESM2	1.94	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
10	IPSL-CM5A-MR	1.98	Institut Pierre Simon Laplace, France
11	HadGEM2-AO	2.09	National Institute of Meteorological Research, South Korea

Tableau 3-1 : Liste des modèles utilisés dans l'outil IDF_CC. (Suite)

12	GFLD-CM3	2.12	National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, USA
13	GFLD-ESM2G	2.16	National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, USA
14	IPSL-CM5A-LR	2.22	Institut Pierre Simon Laplace, France
15	CSIRO-Mk3-6-0	2.43	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia
16	bcc-csm1-1-m	2.55	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China
17	MIROC-ESM- CHEM	2.86	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
18	NorESM1-M	3.10	Norwegian Climate Centre, Norway
19	HadGEM2-ES	3.12	Met Office Hadley Centre, UK
20	bcc-CSM1-1	3.23	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China
21	BNU-ESM	3.40	College of Global Change and Earth System Science, China
22	FGOALS_g2	3.70	IAP and THU China

Le choix du scénario de changements climatiques est dirigé vers les trois RCP utilisés par l'outil IDF_CC afin de comparer les résultats obtenus en fonction des scénarios de changements climatiques mis en place. En effet, compte tenu que la connaissance absolue du scénario qui se réalisera dans le futur est impossible, il serait nécessaire d'utiliser les trois scénarios disponibles dans l'outil afin de réaliser une analyse qui tient compte de tous les cas probables du climat futur.

3.1.2 Pluies en climat futur

Cette partie de la méthodologie présente la méthode utilisée dans cette étude pour générer les pluies en climat changeant. Comme expliqué dans la revue de la littérature, l'outil IDF générant les courbes IDF en climat futur développé par l'université Western Ontario est l'outil de base utilisé pour générer les pluies en climat futur. D'une part, la technique de construction des pluies en climat futur est présentée ; d'autre part, la technique de validation de l'outil IDF est expliquée en annexe.

La construction d'une pluie en climat changeant se fait en cinq principales étapes : le choix du modèle climatique, le choix de la période future projetée, le choix du scénario de changements climatiques considéré, la génération des courbes IDF et la construction de la pluie. Les quatre premières étapes sont nécessaires pour l'utilisation de l'outil IDF. En effet, cet outil est une application qui permet de générer les courbes IDF en climat changeant à partir du modèle climatique sélectionné, de la période future projetée et du choix du scénario de changements climatiques. Les critères de choix du modèle climatique sont présentés au précédent paragraphe ainsi que les scénarios de changements climatiques considérés.

En accord avec les hypothèses formulées, deux périodes futures sont retenues pour la génération des courbes IDF : la période comprise dans l'intervalle de 2045 à 2065 et celle allant de 2080 à 2100. Les périodes sélectionnées possèdent une année de plus que celles présentées au Tableau 3-2 pour répondre aux exigences de l'outil IDF_CC qui ne génère les pluies en climat changeant qu'à partir de 20 années ou plus. Ainsi, en accord avec les observations du GIEC, l'hypothèse d'une augmentation moyenne du niveau de la mer est vérifiée. Le Tableau 3-2 montre les projections émises par le GIEC.

Tableau 3-2 : Changements prévus de la température moyenne globale et du niveau moyen de la mer pour le moyen et la fin du XXI^e siècle par rapport à la période de référence de 1986 à 2005.

(source : IPCC (2013)).

		2046-2065		2081-2100	
	Scénario	Moyenne	Intervalle	Moyenne	Intervalle
variation de la température moyenne planétaire de surface (°C)	RCP2.6	1	0,4 à 1,6	1	0,3 à 1,7
	RCP4.5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6.0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8.5	2	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	Moyenne	Intervalle	Moyenne	Intervalle
Élévation globale moyenne du niveau de la mer (m)	RCP2.6	0,24	0,17 à 0,32	0,4	0,26 à 0,55
	RCP4.5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6.0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8.5	0,3	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Les scénarios de changements climatiques sont choisis de telle sorte que les deux cas les plus critiques sont retenus afin de rester conservateur. Trois scénarios sont retenus : RCP8.5, RCP6.0 et le RCP4.5. Finalement, les courbes IDF sont générées à partir de l'outil IDF qui permet d'obtenir ainsi les paramètres des équations des courbes IDF générées.

La dernière étape consiste à construire des pluies à partir des courbes IDF générées. Ce type de pluies fait partie de la catégorie des pluies synthétiques définies par Brière (2012). Il existe plusieurs méthodes d'élaboration de pluies synthétiques. Les plus courantes sont : la méthode de dérivation de type Chicago, la méthode du NRCS (anciennement SCS) et la méthode du SAE (Service Atmosphérique-Environnement Canada). La méthode du SAE donne de bons résultats pour les pluies de durée 1h. La méthode du NRCS n'est pas recommandée pour la modélisation en milieu urbain. Seule la méthode de type Chicago semble être la plus appropriée pour ce projet. En effet, le guide de gestion des eaux pluviales recommande l'utilisation des pluies de type NRCS ou Chicago pour les durées de pluies de 3h et plus. Étant donné que cette étude est réalisée en zone

urbaine, seule la méthode de dérivation de type Chicago est retenue pour la dérivation des pluies futures à partir des courbes IDF en climat changeant.

En se basant sur les étapes de dérivation de la pluie de Chicago présentées par Rivard (2005), la construction des pluies futures a été élaborée comme suit :

- Choix de la durée de la pluie : selon le guide de gestion des eaux pluviales, les projets qui tiennent compte d'une détermination appropriée des volumes de ruissellement doivent considérer les pluies de durée comprise entre 3h et 6h ; pour les projets dont la mise en place des bassins de rétention est envisagée une durée de 24h est fortement recommandée.
- Sélection du pas de temps : le guide de gestion des eaux pluviales recommande un pas de temps de 10min étant donné qu'un pas de temps de 5min génère des pointes trop accentuées.
- Établissement du paramètre r : généralement, le paramètre r est établi en fonction de l'analyse des précipitations passées, il est généralement compris entre 0,3 et 0,45. Le paramètre r représente la fraction de la durée avant l'atteinte de la pointe du hyétogramme par la durée totale de l'averse. En d'autres termes, il représente l'asymétrie entre le temps avant la pointe et le temps après la pointe.

$$t = \frac{t_{av}}{r} \quad (3-1)$$

$$t = \frac{t_{ap}}{1-r} \quad (3-2)$$

Avec : t = durée totale de la pluie ; t_{av} = durée avant l'atteinte de l'intensité maximale de la pluie ; t_{ap} = durée après l'atteinte de l'intensité maximale de la pluie.

- Génération du hyétogramme de la pluie : la construction du hyétogramme de la pluie est réalisée en considérant l'équation de la courbe IDF à dérivée. Ainsi, l'intensité maximale (représentée par la pointe de l'hyétogramme) est calculée directement à partir de la courbe IDF en posant $t = 10\text{min}$. Après avoir déterminé l'intensité maximale, les équations suivantes permettent de déterminer l'intensité avant la pointe d'une part et l'intensité après la pointe, d'autre part.

$$i_{av} = \frac{a \left[(1-c) \frac{t_{av}}{r} + b \right]}{\left(\frac{t_{av}}{r} + b \right)^{c+1}} \quad (3-3)$$

$$i_{ap} = \frac{a \left[(1-c) \frac{t_{ap}}{1-r} + b \right]}{\left(\frac{t_{ap}}{1-r} + b \right)^{c+1}} \quad (3-4)$$

Avec : i_{av} = intensité avant l'atteinte de la pluie (mm/h) ; t_{av} = temps avant l'atteinte de la pluie ; a, b et c représentent les constantes de l'équation de base de la courbe IDF comme représentée à l'équation

Pour les courbes IDF dont l'équation de base est de la forme :

$$i = \frac{a}{(t+b)^c} \quad (3-5)$$

Où : a, b et c représentent les constantes de la courbe IDF.

Par ailleurs, l'outil IDF_CC donne des courbes IDF dont l'équation de base est de la forme :

$$i = A(t+t_0)^B \quad (3-6)$$

Où : A, B et t_0 représentent les constantes de la courbes IDF.

En égalant les deux types d'équation de base, les constantes A, B, t_0 , a, b et c sont liées par les relations suivantes :

$$a = A \quad (3-7)$$

$$b = t_0 \quad (3-8)$$

$$c = -B \quad (3-9)$$

Ainsi, en substituant les équations ci-dessus dans les équations (3-3) et (3-4), les intensités avant et après l'atteinte de la pointe sont modifiées comme suit :

$$i_{av} = \frac{A \left[(1+B) \frac{t_{av}}{r} + t_0 \right]}{\left(\frac{t_{av}}{r} + t_0 \right)^{-B+1}} \quad (3-10)$$

$$i_{ap} = \frac{A \left[(1+B) \frac{t_{ap}}{1-r} + t_0 \right]}{\left(\frac{t_{ap}}{1-r} + t_0 \right)^{-B+1}} \quad (3-11)$$

Toutefois, le choix des paramètres de l'équation de la courbe IDF est fonction de la période de retour considérée. Cette dernière est déterminée selon le type de réseau étudié et le risque hydrologique considéré. Les détails sur le choix de la période de retour sont présentés à la section 3.4.2.

3.1.3 Mesure des impacts des changements climatiques dans une zone côtière

La mesure des impacts des impacts des changements climatiques en zones côtières consiste à déterminer les événements futurs qui causeraient des débordements au sein du réseau à l'étude. Il s'agit alors de soumettre le réseau à des pluies futures préalablement déterminées. L'utilisation du logiciel SWMM5.1 est retenue pour les simulations du réseau sous les changements climatiques. Deux cas sont simulés pour chacun des scénarios de changements climatiques retenus : (1) le niveau de la mer est constant pour la période de 2045 à 2065 ; on considère une augmentation du niveau moyen de la mer pour la période de 2080 à 2100.

Cas n°1 : le niveau moyen de la mer est quasiment constant (2045-2065)

Dans ce cas les conditions de simulations prises en compte pour les exutoires sont les conditions normales. C'est-à-dire, le niveau d'eau du milieu récepteur est considéré comme normal dans le logiciel SWMM5.1. Dans ce cas, les conditions aux frontières sont définies de telle sorte que le déversement des eaux dans le fleuve se fait en chute libre.

Cas n°2 : augmentation du niveau moyen de la mer (2080-2100)

Une augmentation du niveau moyen de la mer d'une valeur égale à celles présentées au Tableau 3-2 pour chacun des RCP. Dans ce cas le paramètre de simulation définissant les conditions du milieu récepteur est fixé dans le logiciel SWMM5.1. Le Tableau 3-3 présente les valeurs fixées dans les propriétés du milieu récepteur.

Tableau 3-3 : Niveau moyen de la mer considéré pour chacun des RCP.

Élévation du niveau de la mer (m) proche du site.	2080-2100	
	RCP2.6	0,4
	RCP4.5	0,4
	RCP6.0	0,4
	RCP8.5	0,4

Pour chacun des cas proposés, une analyse du rapport de simulation généré par le logiciel est proposée afin de déterminer les débordements observés. La notion de débordement peut être vérifiée en déterminant la performance du réseau. Les critères de performance considérés ainsi que le niveau de service du réseau sont présentés à la section 3.2.

3.2 Détermination de la performance du réseau existant

La performance d'un réseau de drainage peut se définir globalement comme étant sa capacité à évacuer les eaux de ruissellement sans débordements ni inondations. Cela consiste alors à déterminer le niveau de service du réseau en fonction de critères de performance déterminés dans la section 3.2.1. La section 3.2.2 présente la méthode d'évaluation du niveau de service d'un réseau de drainage.

3.2.1 Critères de performance

Les critères de performance permettent d'analyser le niveau de service du réseau. Comme défini dans la littérature, ils peuvent être fonction du ruissellement, de l'infiltration (pertes par infiltration), du débit de pointe à l'exutoire, du nombre de débordements observés ou du volume total d'inondation. Dans cette section les critères de performance utilisés dans cette étude sont définis et classés en deux groupes distincts : critères avant mise en place des PGO et critères après la mise en place des PGO.

➤ Critères évaluant le niveau de service du réseau sans PGO

Les critères de performance évaluant le niveau de service du réseau avant la mise en place des PGO se caractérisent particulièrement par l'observation de débordements et ou d'inondation. Deux

critères sont ainsi définis pour cette étude, soit l'indice d'inondation et l'indice de débordements. L'indice d'inondation tel que présenté par Vidil (2012), est déterminé en identifiant le volume total d'inondation dans les résultats produits par SWMM, soit la colonne « Total flood volume » du rapport d'inondation au nœuds (node flooding). La Figure 3-1 présente la colonne de lecture de l'indice d'inondation dans SWMM5.1. Le but recherché ici est de déterminer la quantité d'eau qui déborde à chaque jonction. Le volume total d'eau qui déborde sera alors estimé en fonction de cet indice.

Summary Results						
Node Flooding ▼ Click a column header to sort the column.						
Node	Hours Flooded	Maximum Rate CMS	Day of Maximum Flooding	Hour of Maximum Flooding	Total Flood Volume 10 ⁶ ltr	Maximum Ponded Depth Meters
J135	0.06	0.060	0	01:19	0.010	0.000
J136	0.01	0.076	0	01:17	0.000	0.000
J138	0.01	0.156	0	01:16	0.001	0.000
J139	0.01	0.044	0	01:15	0.000	0.000
J14	0.01	0.048	0	01:16	0.000	0.000
J141	0.01	0.032	0	01:14	0.000	0.000

Figure 3-1 : Colonne de lecture de l'indice d'inondation.

L'indice de débordements, quant à lui, représente le nombre de jonctions où un débordement est observé. Le but recherché ici est de déterminer s'il y a observation de débordements à chacune des jonctions du réseau. Il est mesuré en fonction de l'indice d'inondation. En effet, si pour une jonction donnée, l'indice d'inondation est supérieur à zéro alors l'indice de débordements est égal à un. Il représente donc le nombre de jonctions où un débordement est observé.

Ainsi, le niveau de service du réseau sans PGO sera déterminé par le nombre total de débordements observés ainsi que par la quantité totale d'eau qui déborde exprimée en litre.

➤ Critères évaluant le niveau de service du réseau avec PGO

Les critères d'évaluation le niveau de service du réseau avec PGO sont composés des indices qui tiennent compte du volume total d'inondation, du nombre de débordements, de l'infiltration, du ruissellement et du débit de pointe à l'exutoire. En effet, après la mise en place des PGO, pour

évaluer le niveau de service du réseau, ces différents indices aideront à déterminer s'il y a réduction d'observation de débordements ou non, réduction du volume ruisselé ou non, augmentation des pertes par infiltration ou non, réduction du débit de pointe à l'exutoire. La mesure de chacun de ces quatre indices se fait en exploitant le rapport de simulations généré par SWMM5.1. Les indices d'inondation et de débordements sont identiques à ceux définis dans le précédent cas. Par analogie à l'étude de Vidil (2012), les indices de ruissellement et d'infiltration sont déterminés respectivement par les lignes « total runoff » et « infiltration loss » de la section « runoff quantity continuity » du rapport de simulations (status report), et l'indice débit de pointe correspond au terme « max flow » du rapport des exutoires (outfall loading). Les Figure 3-2 et Figure 3-3 présentent les colonnes de lecture des indices de ruissellement et de débit de pointe à l'exutoire dans SWMM5.1. Dans cette étude, l'ensemble des indices utilisés est repris au Tableau 3-4.

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Total Precipitation	22.891	48.896
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	7.539	16.104
Surface Runoff	15.070	32.190
Final Surface Storage	0.356	0.760
Continuity Error (%)	-0.322	

Figure 3-2 : Ligne de lecture de la lame d'eau ruisselée et des pertes par infiltration.

Summary Result				
Outfall Loading				
Click a column header to sort the column.				
Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow CMS	Max. Flow CMS	Total Volume 10 ⁶ ltr
Out1	99.47	2.040	7.617	22.198
Out10	99.51	1.314	4.902	14.561
Out16	99.41	0.079	0.257	0.874
Out2	99.27	1.144	3.455	12.492
Out3	99.35	1.374	4.814	15.024
Out4	99.56	0.815	3.431	9.005
Out5	99.37	0.023	0.056	0.261
Out6	99.39	1.172	4.256	12.781
Out7	99.41	0.023	0.075	0.254

Figure 3-3 : Colonne de lecture du débit de pointe à l'exutoire.

Tableau 3-4 : Définition des critères de performance.

Nom de l'indice	Notation	Fonction
Indice d'inondation	I_F	Permet de déterminer le volume total d'eau qui déborde.
Indice de débordements	I_D	Permet de déterminer le nombre total de débordements observés.
Indice d'infiltration	I_I	Permet de déterminer la quantité de pertes par infiltrations.
Indice de ruissellement	I_R	Permet de déterminer la quantité d'eau de pluie ruisselée.
Indice débit de pointe à l'exutoire	I_{QE}	Permet de déterminer le débit évacué.

3.2.2 Niveau de service du réseau à l'étude

Il s'agit d'analyser l'état de service actuel du réseau ainsi qu'en climat changeant. Principalement, le réseau sera analysé sous le climat actuel dans un premier temps, puis sous le climat futur. Les critères de performance définis à la section précédente permettent d'évaluer le niveau de service du réseau. En effet, l'évaluation du niveau de service du réseau consiste à comparer chaque indice avec les valeurs de l'état de base. Ainsi, pour le climat actuel, les indices permettront de déterminer le nombre de points de débordements d'une part, et la quantité totale d'eau débordante. Pour le climat futur, chaque indice de performance du réseau sera comparé à la valeur correspondante en climat actuel d'une part. D'autre part, chaque indice de performance du réseau avec PGO sera comparé à la valeur correspondante au réseau sans PGO.

Cette partie de l'étude est réalisée en deux principales étapes : définition des indices et comparaison des indices. La définition des indices consiste à déterminer la valeur de chaque indice pour trois différents cas : (1) réseau soumis au climat actuel, (2) réseau soumis au climat futur sans PGO et (3) réseau soumis au climat futur avec PGO. Trois cas de comparaison sont retenus : comparaison des indices obtenus en climat futur sans PGO avec ceux obtenus en climat actuel ; comparaison des indices obtenus en climat futur avec PGO et ceux obtenus en climat futur sans PGO et comparaison des indices obtenus en climat futur avec PGO et ceux obtenus en climat actuel. Ainsi, le premier cas de comparaison permet d'identifier les impacts des changements climatiques en matière de drainage des eaux pluviales en zones côtières, le second permet de déterminer les impacts de la mise en place des PGO et le dernier cas de comparaison identifie si la mise en place des PGO en climat futur procure au réseau un meilleur état de service.

3.3 Mise en place des pratiques de gestion optimales

L'adaptation des zones côtières aux changements climatiques se réalise par l'utilisation des mesures d'adaptation les plus rencontrées dans la littérature. Particulièrement, pour cette étude, l'utilisation des PGO est retenue comme technique d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques. La section 3.3.1 présente les PGO les plus rencontrées avec leurs avantages et inconvénients. La section 3.3.2 présente les critères de choix retenus pour cette étude. La section 3.3.3 présente la méthode de classement et de comparaison des PGO sélectionnées.

3.3.1 Liste des PGO disponibles

La présente section présente un résumé des PGO les plus rencontrées élaboré à partir de l'étude réalisée par Mailhot et al. (2008). Les PGO sont généralement séparées en deux grandes familles : les PGO structurales et PGO non-structurales. Les PGO non-structurales représentent l'ensemble de pratiques institutionnelles et de prévention qui visent à prévenir ou à minimiser la présence d'éléments polluants dans le ruissellement et/ou à réduire le volume des eaux de ruissellement. Les PGO structurales représentent l'ensemble d'ouvrages d'ingénierie ou d'aménagement de sites en vue de contrôler les volumes et/ou la qualité du ruissellement. Le résumé des PGO présenté ci-dessous ne traite uniquement que les PGO de type structural.

➤ Système de bio-rétention

Généralement sous la forme d'une dépression végétalisée, les systèmes de bio-rétention permettent de diminuer les volumes de ruissellement urbain, de favoriser la recharge de la nappe phréatique, d'intercepter les sédiments solides en suspension et de capter les polluants solubles.

Leurs principales composantes sont généralement constituées d'un réservoir de surface dont la durée de rétention ne doit pas excéder 72h (le temps optimal est entre 24 et 48h) et la profondeur doit se situer entre 15 et 30 cm; d'un sol organique ou zone racinaire dont la profondeur varie de 60 à 130cm et doit être constitué de 10 à 25% d'argile et de 3 à 5% de matière organique (un PH compris entre 5,5 et 6,5 est recommandé); d'un réservoir de profondeur dont la conductivité hydraulique doit être assez élevée et dont la profondeur est choisie de sorte que la profondeur totale du système ne dépasse pas 4m; d'un système de drainage dont le rôle est de rediriger les eaux dans le réseau en cas d'évènements extrêmes; des plantes qui permettent de réduire le ruissellement par évapotranspiration et d'assurer le maintien d'une bonne porosité (elles doivent tolérer les périodes successives humides et sèches de durée variable).

Leurs principales caractéristiques : la superficie (5 à 15% de la superficie à drainer ou qu'elle puisse permettre la rétention des premiers 2.5cm de précipitation s'abattant sur la surface à drainer), la pente (la pente de la surface drainée doit être inférieure à 5 ou 6%, le plus haut niveau atteint par la nappe doit se situer à un minimum de 1m), la vitesse d'écoulement du ruissellement (prévoir un dispositif qui permettrait de réguler la vitesse d'écoulement dans le système afin d'éviter l'érosion de sol).

Leurs avantages : contrôle et amélioration de la qualité des eaux de ruissellement, peut se présenter sous différentes formes, peut être utilisé comme un aménagement paysager, contribue à la recharge des eaux souterraines.

Leurs limites : risque de colmatage, efficace pour les évènements de faible intensité, coût d'installation généralement plus élevés que les autres PGO.

Application : secteurs résidentiels, commerciaux et industriels.

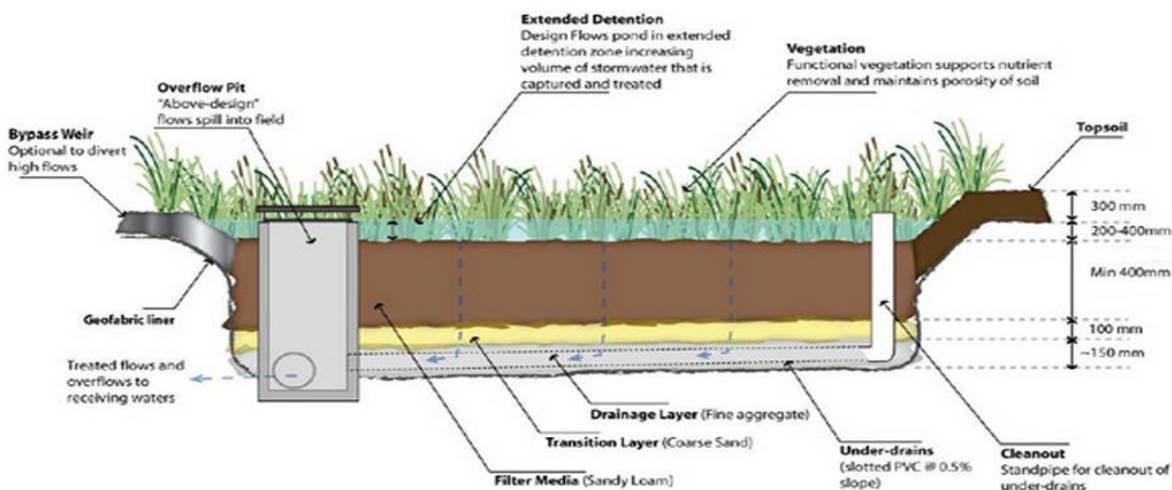


Figure 3-4 : Exemple d'un système de bio-rétention (coupe transversale). (source : Southern Pacific Sands 2015)

➤ Aménagements paysagers avec sol absorbant

Ils ne sont pas destinés à stocker de l'eau, ils doivent uniquement favoriser l'infiltration des eaux de ruissellement dans le sol. Il s'agit ici de mettre en place des aires aménagées avec des substrats ayant une forte capacité de rétention et d'infiltration sans possibilité de perturbation.

Leurs principales composantes : plantes (végétation arborescente et arbustive indispensable, elles permettent de gérer tant la qualité que la quantité des eaux de ruissellement), le sol (constitué de sable et de terreau du fait qu'ils peuvent emmagasiner 7 à 18% de leur volume en eau, ils possèdent une forte conductivité hydraulique, l'épaisseur varie de 15 à 45cm, constitué de 8 à 25% de matière organique).

Leurs avantages : option intéressante pour les secteurs avec de faibles superficies imperméables et avec de fortes proportions d'aires non développées, efficacité optimale pour des événements de période de retour inférieure à 2 ans ou 5ans.

Leurs inconvénients : pauvreté de la documentation existante, coût d'implantation assez élevé.

Application : tout secteur où le sol n'a pas été compacté. Peut être mis en place tant sur un nouveau secteur qu'un secteur déjà bâti.

➤ Système de collecte des eaux des toits

Composé d'un réservoir muni à l'entrée d'un filtre et d'un trop-plein, d'un dérivateur des premières eaux et d'un système de pompe et de filtre adapté à l'usage des eaux collectées.

Principales composantes : réservoir (capacité entre 375 et 5000l, doit être constitué de matériaux chimiquement inertes).

Leurs avantages : peuvent contribuer à la recharge de la nappe, diminuent le volume dirigé vers le réseau et contribuent à une diminution de la demande en eau.

Leurs limites : présentent des difficultés lorsqu'il ne peut exister des solutions de gestions du trop-plein.

Application : idéal pour les zones difficiles d'accès à l'eau potable.

➤ Toits verts

Ils consistent en un aménagement utilisant des végétaux sur le toit d'un bâtiment. Il existe deux types de toits : les toits extensifs et les toits intensifs. Les toits extensifs sont des aménagements légers dont l'épaisseur varie de 20 à 100mm et constitués essentiellement de plantes herbacées. Les toits intensifs sont des aménagements constitués d'arbres et d'arbustes. Le choix du type de toit est guidé par la nature du bâtiment. Lorsque la profondeur de la couche du sol augmente et que la pente diminue, le niveau de rétention du toit augmente.

Leurs avantages : réduction des volumes de ruissellement, permet de contourner les limites en matière de mise en place des aménagements favorisant l'infiltration, améliorent la qualité des eaux de ruissellement, jouent un rôle important en matière de régulation thermique des bâtiments, améliorent la qualité de l'air, réduisent les effets des îlots de chaleur, prolongent la durée de vie des toitures.

Leurs inconvénients : demandent un savoir-faire important, sont assez coûteux, les contraintes imposées aux bâtiments limitent leur applicabilité.



Figure 3-5 : Exemple d'une toiture verte extensive. (source : Environnement 2008)



Figure 3-6 : Exemple d'une toiture verte intensive. (source : Environnement 2008)

➤ Tranchées d'infiltration

Ce sont les aménagements constitués d'une tranchée peu profonde remblayée avec un agrégat rocheux et enveloppée par une membrane textile.

Leurs principales composantes : couche de surface (pour une meilleure capacité filtrante, USEPA suggère l'utilisation du gravillon, sa profondeur est généralement de 0.3m), membrane géotextile (permet d'éviter l'obstruction de l'agrégat de roche, elle doit recouvrir les parois depuis le fond et doit passer entre le substrat de surface et l'agrégat de roches), système de drainage (l'espace libre entre les roches doit être de 30 à 40% du volume total de la tranchée, le diamètre des roches doit varier de 2.5cm à la surface à 7.5cm dans le fond de la tranchée), fond de la tranchée (couche de sable de 15cm), conduite d'observation (tuyau perforé de 10 à 15 cm de diamètre installé verticalement au point le plus profond de la tranchée).

Leurs caractéristiques : superficie à drainer (2ha à 4ha selon qu'on rajoute d'autres aménagements), distance entre la nappe phréatique et le fond de l'aménagement (un minimum de

1m est requis), capacité (l'eau doit s'infiltrer entre 6 et 24h, le taux d'infiltration doit être compris entre 13 et 50mm/h, pente idéale 5%). Leurs avantages : application aux sites déjà bâtis, intéressant pour assurer l'infiltration des eaux des gouttières déconnectées.

Leurs inconvénients : risque de colmatage, durée de vie limitée.

Application : adaptée aux sites ayant une topographie peu accidentée, des sols perméables, une nappe phréatique et une roche mère profonde et une surface à drainer relativement petite. Non adaptée au site dont le sol est composé à plus de 20% d'argile. Non applicable sur les sols argileux, limoneux et les sites remblayés.

➤ Dépressions végétalisées

Chenal ouvert possédant une couverture végétale dense le long des pentes et dans le lit du chenal.

Leurs principales composantes : végétation (le niveau d'eau dans le chenal ne doit pas dépasser les 2/3 de la hauteur de la végétation présente, elle doit être capable de tolérer les conditions de submersion temporaire et de sécheresse), sols (épaisseur 75cm, doit assurer un taux d'infiltration d'au moins 0.2mm/s, doit contenir de la matière organique et 15% d'argile, doit contenir du sable), digues (recommandées lorsque la pente du chenal est supérieure à 3%, leur hauteur est comprise entre 15 et 30cm), système de drainage (nécessaire lorsque la perméabilité du sol ne permet pas d'infiltrer tout le volume d'eau de ruissellement, constitué d'un lit de roche semblable à celui des tranchées d'infiltration, une épaisseur du lit d'environ 15cm au moins est recommandée, il doit être entre 0.6 et 2m sous le chenal, sa profondeur est fonction du volume d'eau à retenir et de la perméabilité du sol originel).

Leurs principales caractéristiques : taux de rétention et temps de rétention (0.2mm/s au minimum, le temps de rétention doit varier entre 10min et 24h), distance entre la nappe phréatique et le fond de l'aménagement (comprise entre 60 et 90cm), la vitesse d'écoulement et pente du chenal (les pentes ne doivent excéder 4%, toutefois, la pente du chenal peut être comprise entre 1 et 6% à conditions d'installer un système de drainage si elle est inférieure à 2% ou des digues si elle est supérieure à 4%). Section du chenal (la forme trapézoïdale est suggérée, la largeur varie de 60 à 240cm, la longueur ne devrait pas dépasser 30 à 60m, la profondeur doit être au maxi de 45cm à la fin du chenal et de 30cm en moyenne tout le long du chenal, les pentes latérales doivent être comprise entre 1/3 et 1/5), la végétation (elle doit être dense), pluie de conception et capacité (période de retour de 10ans est suggérée, débits de pointe ne doivent en aucun cas excéder 140l/s),

secteur et superficie à drainer (idéal pour drainer les routes et les stationnement, la superficie à drainer doit être inférieure à 2ha mais peut atteindre 4ha, la superficie de la dépression doit correspondre à 10 ou 20% de la surface imperméable à drainer).

Leurs avantages : assurent un contrôle efficace des débits de pointe, favorisent la filtration et l'infiltration des eaux de ruissellement.

Leurs inconvénients : ne conviennent pas pour les secteurs industriels et commerciaux importants, ni pour les milieux urbains denses, sensibilité à la compaction lorsqu'elles sont installées en bordure de route, ne permettent pas la gestion des pluies d'une récurrence au-delà de 10ans.

Application : généralement installées à la limite des propriétés. Non approprié pour les secteurs graveleux et sablonneux, sites ayant été le lieu de passage de transports lourds, les sites compactés.

3.3.2 Critères de choix d'une PGO

Le choix d'une PGO peut être fonction des contraintes liées au site d'implantation, des contraintes liées au climat de la région, des contraintes liées aux coûts de mise en place et d'exploitation et des contraintes liées à leur applicabilité. Pour cette étude, la liste des PGO retenues pour cette étude est établie en fonction du type de sol rencontré dans la région, des contraintes liées à l'occupation du secteur d'implantation de la PGO et des contraintes d'applicabilité de la PGO. Toutefois, les contraintes liées aux coûts de mise en place et d'exploitation permettent d'orienter le choix des PGO vers les PGO les moins chères.

Aussi, les PGO peuvent être choisies en fonction du type de zones côtières. En effet, les PGO utilisées pour une zone côtière de type sablonneuse sont différents de celles utilisées en zone côtière de type argileuse ou limoneuse. Ainsi le classement des PGO présenté à la section 3.3.3 est fait en fonction du type de zones côtières.

3.3.3 Classement des PGO sélectionnées

Les PGO sélectionnées sont classées en fonction de leur applicabilité, de leurs caractéristiques et du type de secteur d'implantation. Aussi, le type de zones côtières permet d'exclure certaines PGO de l'étude. Ainsi, pour les zones côtières, le classement des PGO est donné en fonction du type de zones côtières rencontrées.

Pour les zones côtières de type argileuses, les tranchées d'infiltration sont à proscrire. En effet, l'applicabilité des tranchées d'infiltration exclue les secteurs argileux et limoneux. En ce qui concerne les autres types de PGO, une connaissance approfondie du type d'argile rencontrée est recommandée pour valider l'orientation du choix de la PGO.

Pour les zones côtières de type sablonneuses, les dépressions végétalisées sont fortement déconseillées. En effet, ce type de PGO n'est pas recommandé pour les secteurs graveleux et sablonneux. Concernant les autres types de PGO, leur classement est réalisé en fonction des caractéristiques d'occupation du secteur d'implantation. Dans ce cas, une connaissance approfondie desdites caractéristiques est recommandée.

En résumé, les PGO applicables aux zones côtières sont classées et sélectionnées en fonction du type de zones (sablonneuse, argileuse ou limoneuse) et des caractéristiques du secteur d'implantation (secteur industriel, résidentiel ou commercial). Le Tableau 3-5 présente les PGO en fonction du type de zones côtières.

Toutefois, les contraintes climatiques du site à l'étude limitent l'applicabilité de certaines PGO. Par exemple, les PGO favorisant l'infiltration avec la mise en place de végétation sont limitées par certaines contraintes climatiques telles que le froid. En effet, la mise en place de ce type de PGO en zone froide requiert l'utilisation de plantes qui résistent à ce climat. Toutefois, pour les toits verts et les jardins de pluie, l'étude de Géhéniau (2014) montre de bons résultats de leur utilisation en climat nordique.

Ainsi, pour les zones côtières en région nordique, il est préférable de restreindre les PGO dont la mise en place requiert la présence de plantes. Toutefois, si le type de plantes qui résistent au climat nordique est disponible sur le site, l'application des PGO prenant en compte la végétation peut être retenue. De ce fait, les PGO qui favorisent l'infiltration sans nécessité de mise en place de plantes peuvent être favorables aux zones côtières nordiques. Comme exemple, les pavés poreux peuvent être considérés comme meilleurs choix pour les zones côtières nordiques. Aussi, le Tableau 3-6 présente les coûts des certaines PGO de type contrôle à la source, dérivés de Fuamba et Kanyinda (2015). Ainsi, dans la suite de ce projet, le choix des PGO est aussi influencé par le coût des PGO. Pour cette étude, les toits verts ne sont pas sélectionnés en raison de leur coût élevé d'implantation et d'entretien (cas des toits verts intensifs) en comparaison aux autres PGO présentées dans le tableau 3-6.

Tableau 3-5 : PGO par type de zones côtières.

PGO	Zones sablonneuses	Zones argileuses ou limoneuses
Système bio-rétention	Pour secteur résidentiel, commercial et industriel.	Pour secteur résidentiel, commercial et industriel.
Aménagements paysagers avec sol absorbant	Secteur non compacté	Secteur non compacté
Toit vert	Limités par les contraintes du bâtiment	Limités par les contraintes du bâtiment
Tranchées d'infiltration	Peut être mis en place	Non recommandé
Dépressions végétalisées	Non recommandé	Peut être mis en place
Collecte des eaux des toits	Pour secteur résidentiel	Pour secteur résidentiel

Tableau 3-6 : Coûts de quelques PGO.

PGO	Coûts d'installation	Coûts d'entretien
Toits verts intensifs	520 \$/m ² à 3120 \$/m ²	13.5 à 21.5 \$/an/m ²
Toits verts extensifs	240 \$/m ² à 510 \$/m ²	1 \$/an/m ²
Débranchement des gouttières	250 à 1250 €	1€/m ³ /an
Pavés poreux	20 à 35 €/m ²	2 €/m ² /an
Jardin de pluie	100 000 à 400 000 \$	1 \$/an/m ²

3.4 Application à une étude de cas

Cette section permet tout d'abord de présenter les zones côtières au sens considéré pour cette étude afin de permettre une meilleure compréhension du choix du site à l'étude et du terme zone côtière

au sens de ce projet (section 3.4.1). Ensuite, elle présente les principes et hypothèses de conception d'un réseau de drainage en milieu urbain utilisés pour la modélisation du réseau de drainage étudié (section 3.4.2). Enfin, il sera présenté l'ensemble des méthodes utilisées pour le traitement des données afin de les harmoniser du fait qu'elles proviennent de différentes sources (3.4.3).

3.4.1 Définition d'une zone côtière

La définition et la délimitation d'une zone côtière sont fonction de l'utilisation, de la gestion et/ou de l'analyse de ladite zone, ainsi que de l'échelle utilisée. En effet, que ce soit pour la définition ou pour la délimitation des zones côtières, aucun consensus permettant une formulation universelle de ces éléments n'existe à ce jour (Drejza 2010). Toutefois, une définition générale du terme zone côtière renvoie à l'interface terre-mer. Les zones côtières sont ainsi constituées d'une partie terrestre (continentale) et d'une partie marine.

Pour cette étude, les zones côtières sont sélectionnées pour y étudier la mise en place d'une gestion efficace des eaux pluviales en milieu urbain. Par conséquent, uniquement la partie continentale est retenue pour ce projet. Ainsi, dans le cadre de cette étude, le terme zone côtière renvoi à la région terrestre urbanisée directement en contact avec l'eau.

Dans sa politique de protection des zones côtières, la province du Nouveau-Brunswick a établi un découpage de sa zone côtière qui permet de donner une définition précise des zones côtières (MEGL 2014). La figure montre le découpage de la zone côtière utilisé au Nouveau-Brunswick.

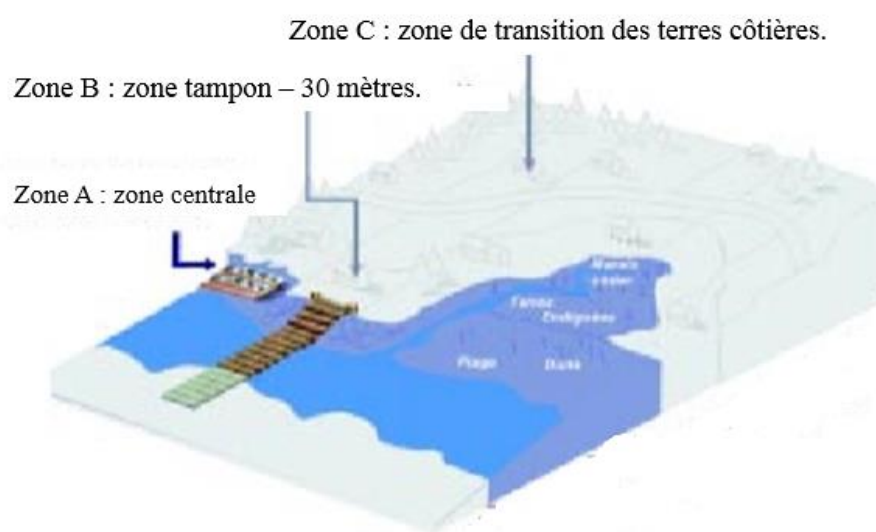


Figure 3-7 : Découpage de la zone côtière au Nouveau-Brunswick. (source : MEGL 2014)

Malgré le zonage proposé par le Nouveau-Brunswick, la délimitation de la partie continentale reste toujours imprécise comme le montre la figure seule la zone B (zone tampon) est limitée par une extension continentale de 30m et la zone de transition ne présente aucune limite géographique. Bien que la délimitation d'une zone côtière varie selon les études, elle reste néanmoins de l'ordre du kilomètre. En effet, différentes études limitent les zones côtières selon leur utilisation sans toutefois dépasser les 10km de la ligne des hautes eaux comme le montre le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Exemple de limites de la zone côtière. (source : Drejza 2010)

Pays	Limite terrestre	Limite marine
Brésil	à 2 km de la LHE	à 12 km de la LHE
Costa Rica	à 200 m de la LHE	la LBE
Chine	à 10 km de la LHE	isobathe de 15 m de profondeur
Israel	1 à 2 km (variable)	à 500 m de la LBE
Australie du sud (AU)	à 100 m de la LHE	à 3 miles nautiques de la LB
Queensland (AU)	à 400 m de la LHE	à 3 miles nautiques de la LB
Espagne	500 m à partir de la plus haute tempête ou ligne de marée	à 3 miles nautiques (limite des eaux territoriales)
Sri Lanka	à 300 m de la LHE	à 2 km de la LBE

Abréviations : LHE = Ligne des hautes eaux ; LBE = Ligne des basses eaux ; LB = ligne de base

Ainsi, pour cette étude, la délimitation de la zone côtière à l'étude est de moins de 2 km à partir de l'interface terre-eau. En d'autres termes, pour cette étude, une zone côtière se définit comme étant la partie terrestre en contact avec l'eau et se limitant jusqu'à 2 km de la ligne de côte.

3.4.2 Modélisation d'un réseau de drainage

La modélisation du réseau de drainage requiert la détermination des caractéristiques du réseau, du secteur étudié et celles des pluies de projet. Elle se fait en deux principales étapes : la conception du réseau et la mise en service du réseau. La première étape est réalisée par la méthode rationnelle qui permet d'obtenir le débit de ruissellement pour chacun des sous lots. La mise en service du réseau est réalisée par l'utilisation du logiciel SWMM5.1. Mais, au préalable, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques des pluies de projet, des sous bassins de drainage et du réseau de

drainage. Ce sont ces différentes caractéristiques qui servent d'intrants au logiciel SWMM5.1 pour réaliser les soumissions du réseau aux différents états de climats prédéfinis.

Aussi, le choix du logiciel SWMM5.1 comme logiciel de modélisation se justifie par son acquisition gratuite sur internet. Toutefois, il est identique au logiciel SWMM5.0 à quelques exceptions près concernant la présentation des résultats et de certaines interfaces.

➤ Caractéristiques des pluies

Pour cette étude trois pluies de projet sont définies : deux pluies représentant le climat futur et une, représentant le climat actuel. Les caractéristiques de conception des pluies sont constituées par la période de retour qui traduit le risque acceptable, la durée de l'averse et le type de pluies utilisé pour la conception de la pluie. Comme montré à la section 3.1.2, le type de pluie utilisé pour la conception des pluies de projet est la pluie de type Chicago. La définition du type de réseau étudié permet de valider les choix des caractéristiques recherchées. En effet, le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP 2010) recommande les périodes de retour en fonction du type de réseau étudié. Pour le réseau mineur, une période de retour de 2 à 10 ans est acceptable. Ce qui permet de retenir un période de retour de 5 ans pour cette étude. Concernant la durée de l'averse, une durée de 3h est retenue pour chacune des pluies à concevoir. Concernant le paramètre d'asymétrie r , le choix est orienté vers une valeur de $r = 0,4$.

Toutefois, la méthode de construction des pluies en climat futur est décrite à la section 3.1.2. Pour le climat actuel, la construction de la pluie a été réalisée à partir de l'outil Aqua IDF.

Aussi, la pluie en climat actuel représente la pluie de conception du réseau. La modélisation du réseau soumis à cette pluie représente ainsi l'état de référence du réseau.

➤ Caractéristiques des sous bassins versants

Le bassin à drainer est subdivisé en sous bassins ou sous lots de drainage. Pour la modélisation des réseaux de drainage, une connaissance des caractéristiques des sous bassins est requise. Les caractéristiques des sous bassins sont définies suivant l'occupation de sol, le type de sol rencontré et de leur délimitation. Ainsi, suivant l'occupation du sol, le coefficient du ruissellement est déterminé en se référant au Tableau 3-8 tout en précisant que les valeurs retenues sont les valeurs extrêmes pour rester conservateurs. La délimitation des sous bassins est réalisée suivant la méthode de délimitation proposée par Brière (2012) qui consiste à délimiter la surface drainée en considérant

la moitié des aires de chaque côté de la rue. La pente des sous bassins est déterminée par le logiciel Global Mapper dans lequel la délimitation est aussi réalisée.

Suivant le type de sol, les paramètres de l'équation de Green-Ampt, équation utilisée pour déterminer l'infiltration dans SWMM5.1, sont déterminés suivant la littérature des différents sols proposée dans le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP 2010).

Tableau 3-8 : Coefficient de ruissellement en fonction de l'occupation du territoire. (source : Brière 2012)

Quartier	Coefficient de ruissellement, <i>R</i>
Commercial	
• centre-ville	0,70 - 0,95
• banlieue	0,50 - 0,70
Résidentiel	
• maisons unifamiliales	0,30 - 0,50
• maisons multifamiliales, détachées	0,40 - 0,60
• maisons multifamiliales, en rangées	0,60 - 0,75
• maisons de banlieue peu développée	0,10 - 0,25
• maisons de banlieue	0,25 - 0,40
• immeubles à usage locatif	0,50 - 0,70
Industriel	
• densité moyenne	0,50 - 0,80
• densité élevée	0,60 - 0,90
Pares, cimetières, prairies	0,10 - 0,25
Terrains de jeux	0,25 - 0,35
Terrains en friche	0,10 - 0,30

➤ Caractéristiques du réseau de drainage

Les caractéristiques du réseau de drainage sont constituées du diamètre des conduites, de leur pente, leur longueur et de la profondeur des radiers inférieurs des jonctions. Ces caractéristiques sont déterminées à l'aide du pré-dimensionnement réalisé par la méthode rationnelle. Toutefois, la détermination de ces caractéristiques requiert le respect de certaines contraintes indispensables au fonctionnement du réseau. Parmi ces contraintes, les vitesses minimale et maximale sont les plus vérifiées pour assurer l'auto curage (vitesse minimale) et pour éviter l'érosion des parois des conduites (vitesse maximale). Selon la directive 004 du MDDEFP (1989), la vitesse minimale est estimée à 0,6m/s et la vitesse maximale à 4,5m/s. Toutefois, pour assurer une vitesse minimale de 0,6m/s lorsque le réseau n'est pas utilisé à pleine capacité, il est recommandé d'utiliser une vitesse minimale de 0,9m/s lors du pré-dimensionnement des conduites. Brière (2012) recommande une vitesse maximale de 3m/s. Ainsi, pour cette étude, les vitesses minimales et maximales considérées sont respectivement de 0,9m/s et 3m/s.

Concernant les longueurs des conduites, elles sont relevées en respectant les distances maximales requises entre deux regards. Selon la directive 004 du MDDEFP (1989), la distance maximale entre deux regards est donnée en fonction du diamètre des conduites. Ainsi, pour les conduites ayant un diamètre inférieur à 900mm, la distance maximale entre deux regards est de 120m ; pour les conduites ayant un diamètre supérieur à 900mm, cette distance est de 250m.

3.4.3 Acquisition et traitement des données

➤ Sources des données et méthodes de traitement.

Les données utilisées proviennent de différentes sources : site web environnement canada, ville de Sept-Îles, outil IDF, Aqua IDF, etc. toutes les données reçues ont été traitées et analysées afin de ressortir les caractéristiques nécessaires et primordiales à la réalisation de cette étude. Ainsi, les données collectées renseignent essentiellement sur les caractéristiques du bassin versant, des précipitations et du réseau de drainage. Toutefois, elles possèdent plusieurs manquements comme par exemple la pente des conduites constituant le réseau de drainage, les caractéristiques des sous-lots à desservir, la distribution temporelle des précipitations. Concernant le traitement des précipitations, la section 3.1.2 présente explicitement la méthode de traitement qu'elles ont subie. Les paragraphes suivants présentent les méthodes de traitement et d'acquisition des données

relatives au secteur étudié d'une part, et d'autre part, les données relatives au réseau de drainage du secteur.

➤ Acquisition et traitement des données du secteur

Les données relatives au secteur étudiées ont été collectées via l'outil GEOGRATIS qui fournit les modèles de terrain, disponible sur le site d'environnement canada. En effet, cet outil produit des modèles de terrains des secteurs selon la délimitation de la zone choisie. Ensuite, les données collectées via GEOGRATIS sont lues et exploitées dans le logiciel Global Mapper afin de produire les sous lots et leurs caractéristiques tels que la pente, l'aire, la largeur de drainage, les côtes d'élévation du terrain naturel en amont comme en aval du sous lot. Toutefois, la détermination de l'occupation du sol a été déterminée par navigation dans le logiciel Google Earth. Aussi, l'exploitation de ces données est faite en respectant les normes de conception et de modélisation des réseaux de drainage des eaux urbaines.

➤ Acquisition et traitement des données du réseau

Les données du réseau de drainage, bien qu'elles aient été émises par la municipalité de la ville d'étude, présentent plusieurs manquements tels que la longueur des conduites, leur pente, la profondeur des radiers amont et aval. La méthode de traitement de ces données consiste à superposer les différentes cartes disponibles afin de ressortir les données manquantes qui sont indispensables à la modélisation du réseau. Le chapitre suivant présente plus explicitement le traitement des données. La Figure 3-8 présente le schéma général de la méthodologie.

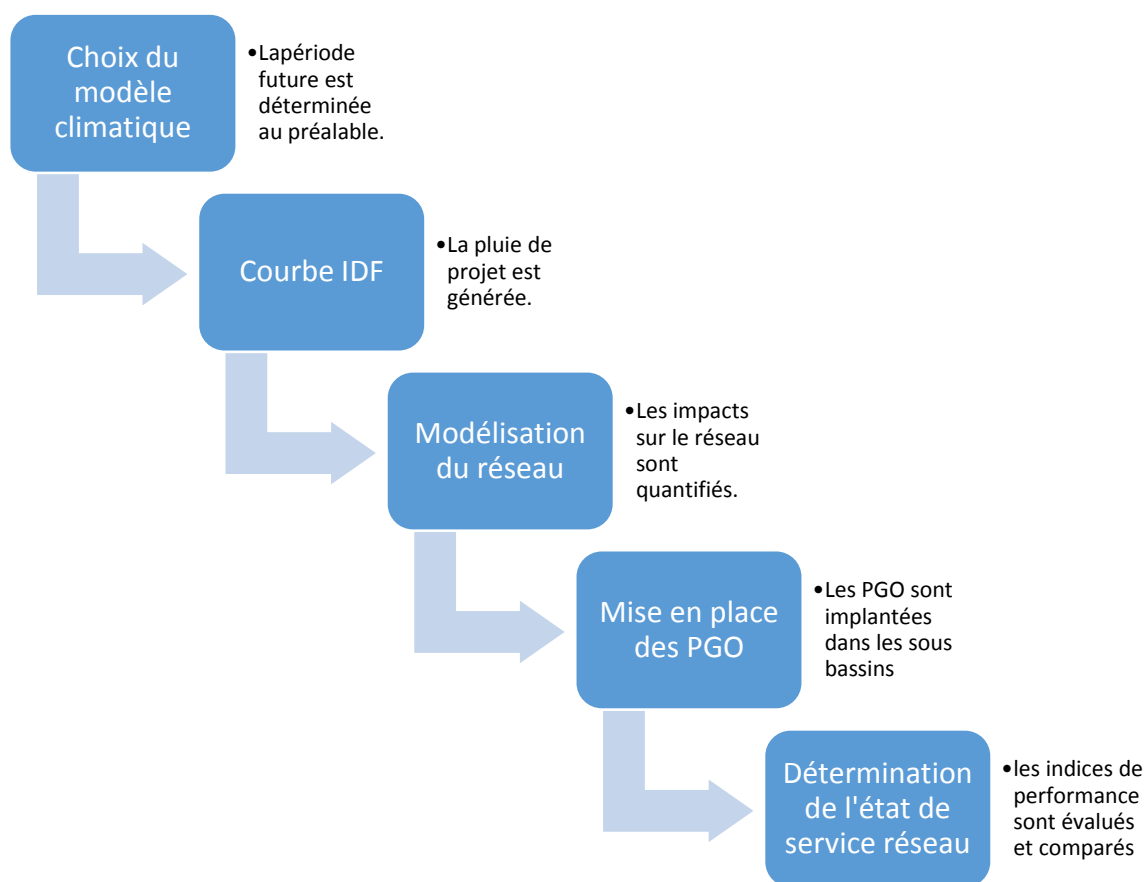


Figure 3-8 : Schéma général de la méthodologie.

CHAPITRE 4 EXEMPLE D'APPLICATION

Cette section présente l'application de la méthodologie à la zone d'étude constituée par la ville de Sept-Îles. La section 4.1 présente la définition et la délimitation de la zone d'étude ainsi que du bassin et du réseau de drainage. La section 4.2 présente les pluies de projet utilisées pour les simulations réalisées. La section 4.3 présente les paramètres de modélisation du réseau de drainage. La section 4.4 présente une application de gestion des eaux pluviales en climat changeant.

4.1 Présentation de la zone d'étude

Pour cette étude, la zone côtière sélectionnée est la ville de Sept-Îles. Cette ville est comptée parmi les villes du Québec maritimes qui sont exposées aux impacts des changements climatiques. Plus précisément, le centre-ville de la ville de Sept-Îles. La section 4.1.1 présente la ville de Sept-Îles, la section 4.1.2 présente le bassin à l'étude et la section 4.1.3 présente le réseau à l'étude.

4.1.1 Présentation géopolitique

Sept-Îles est une ville de la province du Québec située sur la rive nord du golfe du Saint-Laurent. Elle compte près de 29 000 habitants avec une densité approximative de 15 hab/km² et une superficie d'environ 1970 km². Cette région est soumise à un climat maritime froid. Elle se divise en neuf différents secteurs : Gallix, Clarke, Ferland, Centre-ville, Plages, De Grasse-Maliotenam-La Boule, De la Pointe, De la Rivière et Matamac. La Figure 4-1 présente la division de la ville en ces différents secteurs. L'étude de cas sélectionnée ne s'applique uniquement que sur le secteur centre-ville. Une vue aérienne du centre-ville de Sept-Îles est présentée à la Figure 4-2.

4.1.2 Présentation du bassin versant

Le bassin versant à l'étude est essentiellement constitué de la partie centre-ville de la ville de Sept-Îles et est présenté à la Figure 4-3. Il se délimite à partir de la ligne de côte jusqu'au boulevard Laure, soit sur moins de 2 km à partir de la ligne de côte. Il est bordé par la rue Retty et le fleuve Saint-Laurent. Il est majoritairement occupé par des habitations de type maisons multifamiliales détachées. Toutefois, des zones industrielles et commerciales y sont aussi observées, ainsi que des zones à caractère récréatif (terrains de jeu, prairies). La définition de l'occupation du territoire est faite à partir d'une analyse de la carte de la région dans l'outil Google Earth. Aussi, les sols rencontrés dans la région du centre-ville de Sept-Îles sont essentiellement des sables granitiques magnétiques (Gouvernement 2013). Concernant le relief de la zone, la pente naturelle du secteur favorise un écoulement des eaux de surface dans le sens du boulevard Laure vers le Fleuve Saint-Laurent.



Figure 4-3 : Bassin versant à l'étude.

4.1.3 Présentation du réseau de drainage

La présente section présente le réseau à l'étude. La Figure 4-4 présente une image du réseau telle qu'obtenue par la ville. Les sens d'écoulement et les diamètres des conduites sont les seuls éléments disponibles sur cette image. Les diamètres des conduites varient de huit pouces (203 mm) à soixante pouces (1525 mm). Le réseau est constitué d'environ 500 conduites, plus de 600 jonctions et de 11 exutoires. Les principaux collecteurs prennent leur départ depuis le boulevard Laure et se terminent vers le fleuve. Pour cette étude, le nombre de conduites et celui de jonctions seront modifiés afin d'harmoniser le réseau de drainage avec les normes de conception d'un réseau de drainage. Cela s'applique aussi au diamètre de certaines conduites.

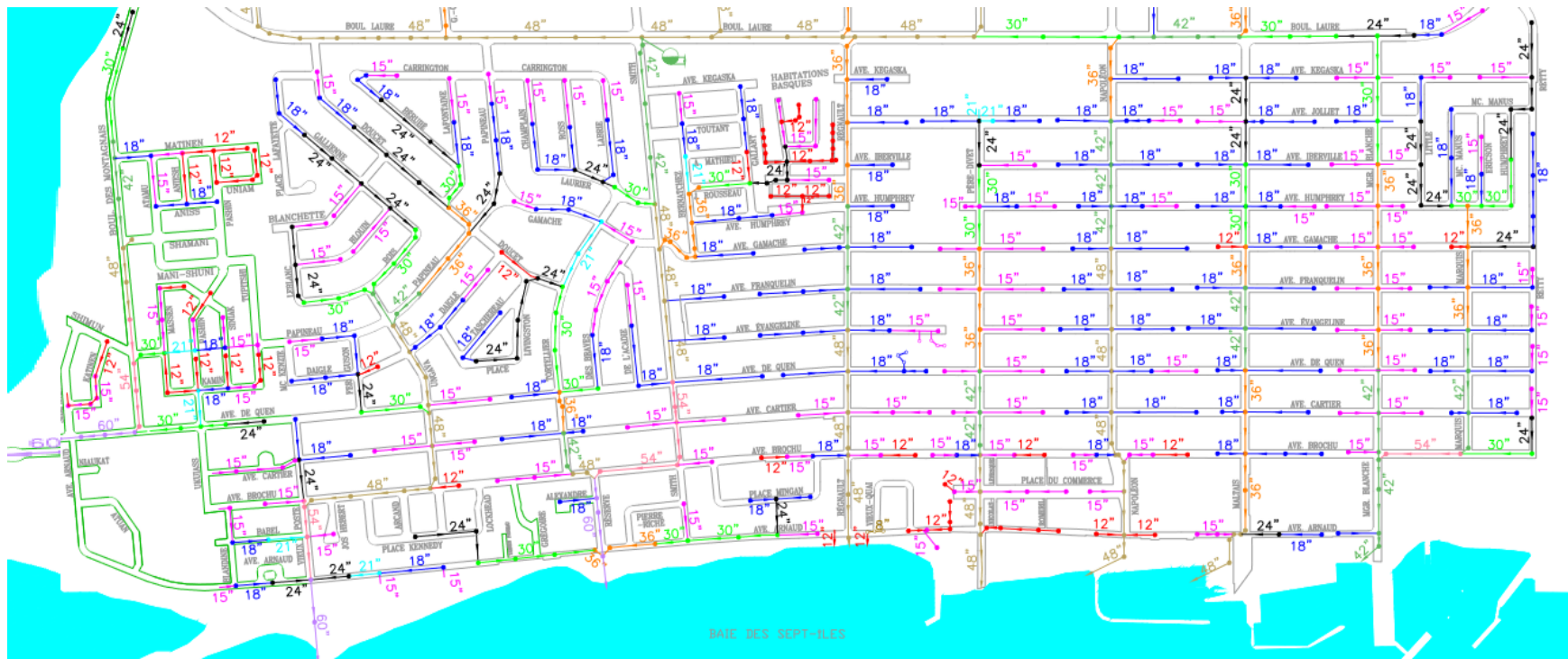


Figure 4-4 : Réseau à l'étude.

4.2 Pluies de projet

Dans cette section la conception des pluies en climat actuel et en climat futur est présentée. La station pluviométrique retenue pour la ville de Sept-Îles est la station Sept-Îles A située à l'aéroport de Sept-Îles et disponible dans l'outil IDF_CC. Le choix de cette station, en comparaison aux différentes stations du secteur, est retenu particulièrement du fait qu'elle possède une gamme élargie des données historiques et que l'aéroport de Sept-Îles est plus proche du centre-ville de Sept-Îles. La Figure 4-5 et la Figure 4-6 montrent la position de la station par rapport au bassin versant et les caractéristiques de la station à l'étude.

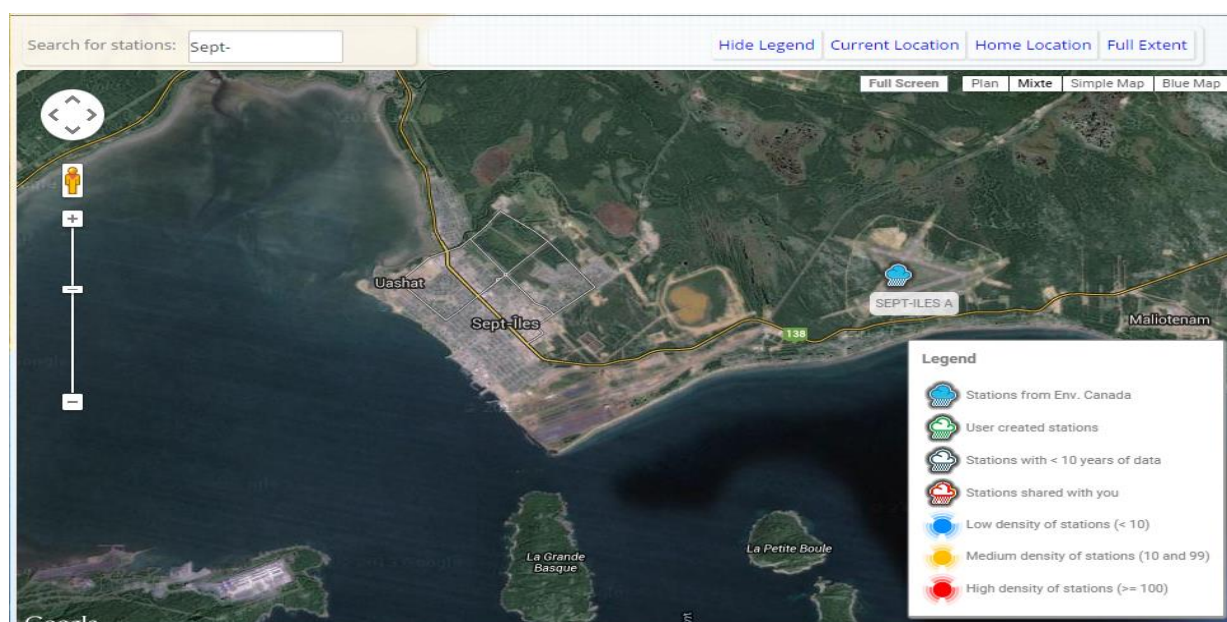


Figure 4-5 : Position de la station Sept-Îles A par rapport au centre-ville.

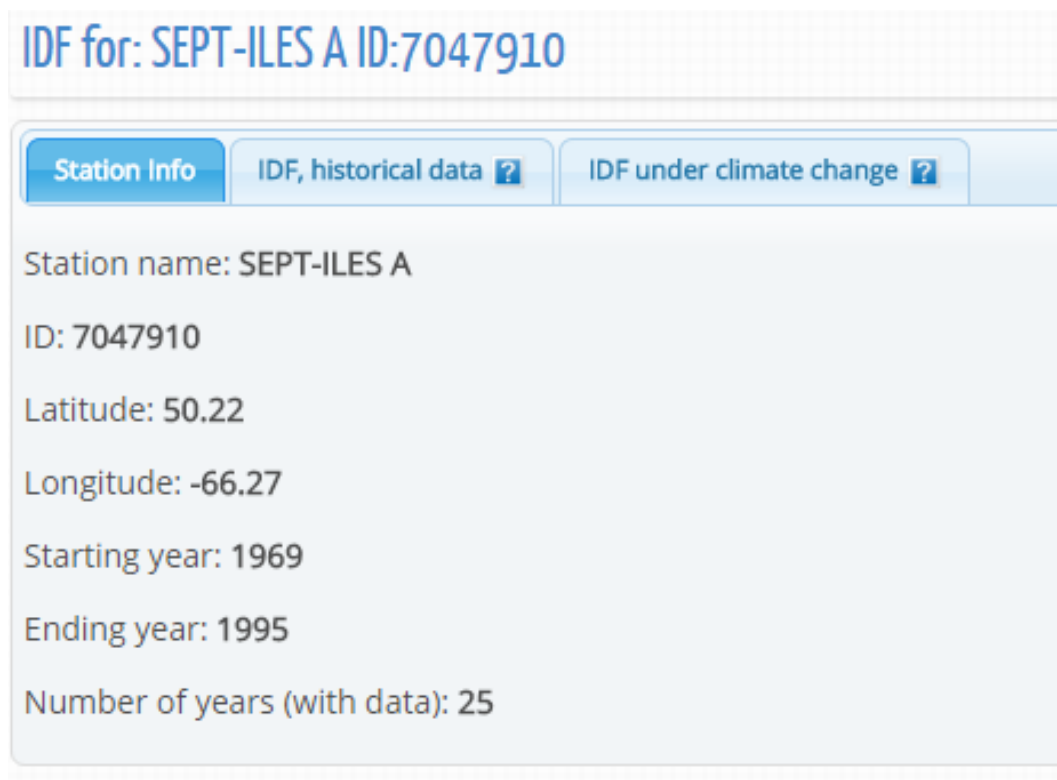


Figure 4-6 : Caractéristiques de la station Sept-Îles A.

4.2.1 Pluie en climat actuel

La pluie de projet en climat actuel est générée à partir de la courbe IDF conçue à l'aide des données historiques couvrant la période de 1969 à 1990. D'après les caractéristiques des pluies présentées dans la section 3.1.2, la pluie de projet en climat actuel générée par l'outil Aqua IDF est une pluie de type Chicago de durée 3h avec un pas de temps de 10 min et une asymétrie $r = 0,4$. En effet, pour une période de retour de $T = 5$ ans, l'équation de la courbe IDF correspondante est présentée dans l'équation. Toutefois les valeurs d'intensités diffèrent légèrement de celles du d'environnement Canada. Ainsi, l'outil ajoute une intensité de 1,003mm/h à chaque pas de temps pour ajuster le volume total de la pluie au volume correspondant indiqué par environnement Canada.

$$i = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (4-1)$$

Avec : i = intensité de la pluie en mm/h ; t = durée de la pluie en min, $a = 161,195$;

$b = 0,00$; $c = 0,05458$.

Toutefois, comme indiqué dans la méthodologie, pour une pluie de type Chicago l'intensité correspondant au temps de pointe est calculée à partir de l'équation (4-1) en remplaçant t par le pas de temps. Le Tableau 4-1 et la Figure 4-7 présentent le hyétogramme de la pluie en climat actuel produite par l'outil Aqua IDF.

Tableau 4-1 : Intensité en fonction du temps de la pluie en climat actuel.

Temps (h:mm)	00 :00	00 :10	00 :20	00 :30	00 :40	00 :50	01 :00	01 :10	01 :20	01 :30
Intensité (mm/h)	0	5,806	6,32	7,031	8,102	9,997	15,071	46,88	16,454	11,608
Temps (h:mm)	01 :40	01 :50	02 :00	02 :10	02 :20	02 :30	02 :40	02 :50	03 :00	
Intensité (mm/h)	9,539	8,32	7,493	6,887	6,418	6,041	5,73	5,469	5,244	

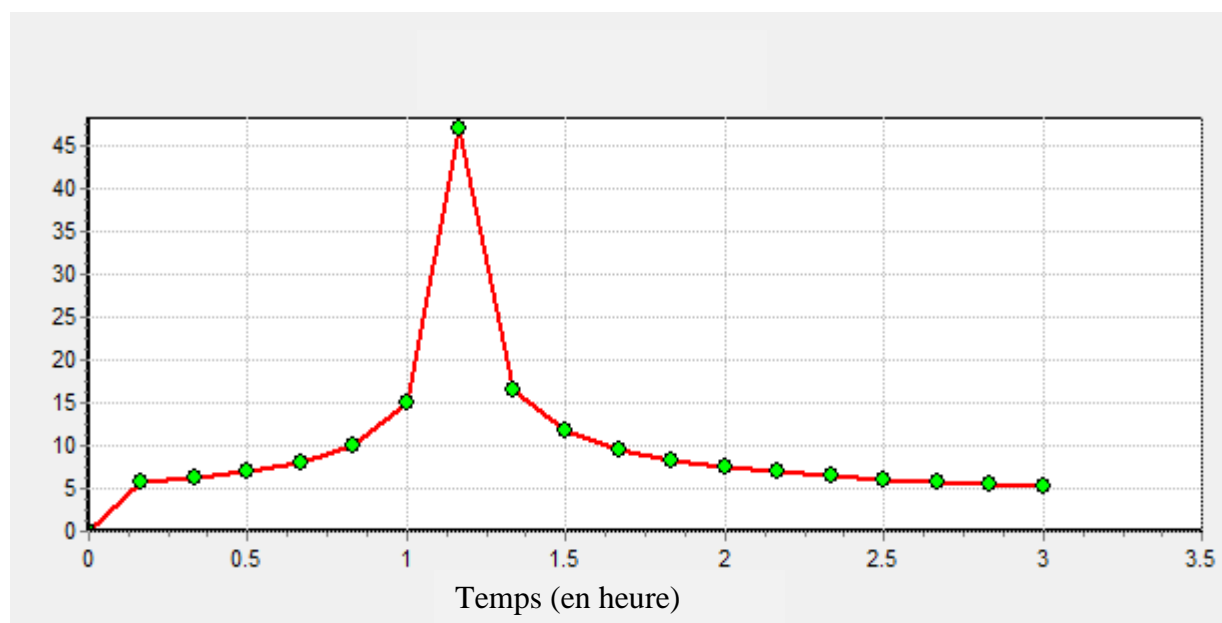


Figure 4-7 : Hyétogramme de la pluie en climat actuel.

4.2.2 Pluie en climat futur

En climat futur, deux périodes ont été retenues : 2045-2065 et 2080-2100. Avec l'outil IDF_CC, les courbes IIDF les pluies sont générées pour chacun des scénarios RCP en considérant le modèle MIROC5 comme expliquer à la section 3.1.1. Pour une récurrence de 5 ans, les caractéristiques des courbes IDF obtenues pour chacune des périodes sont présentées au Tableau 4-2. Aussi, la pluie de type Chicago de durée 3h avec une asymétrie $r = 0,4$ est appliquée pour la production des pluies en climat futur comme en climat actuel sans toutefois appliquer de correction pour le dernier cas.

Tableau 4-2 : Caractéristiques des courbes IDF en climat futur avec $T = 5$ ans.

Période	2045-2065			2080-2100		
Scénarios	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
A	22,2	22,8	24	23,6	23	32,9
B	-0,552	-0,552	-0,554	-0,554	-0,552	-0,561
t_0	0	0	0	0	0	0

À partir des équations (3.10) et (3.11), les hyétoigrammes des pluies sont générés. Tout en rappelant que l'intensité de pointe est calculée à partir de la courbe IDF en remplaçant la durée de la pluie par le pas de temps de 10min. les hyétoigrammes obtenus sont présentés dans les figures qui suivent. Toutefois, en fonction de la période future considérée et du scénario, les pluies sont renommées comme montré au Tableau 4-3, leur hauteur totale est également donnée.

Tableau 4-3 : Noms des pluies correspondantes à chacun des scénarios RCP.

Période	2045-2065			2080-2100		
Scénarios	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Nom de la pluie	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7
Hauteur totale (mm)	38,231	39,349	39,976	36,189	37	48,896

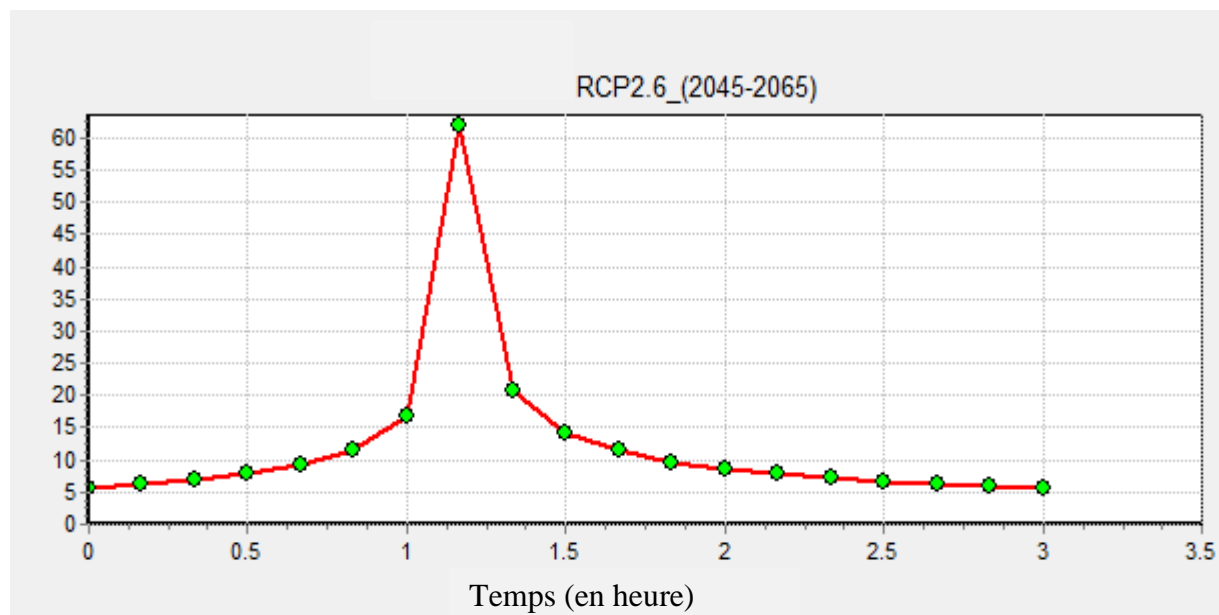


Figure 4-8 : Hyétogramme de TS2.

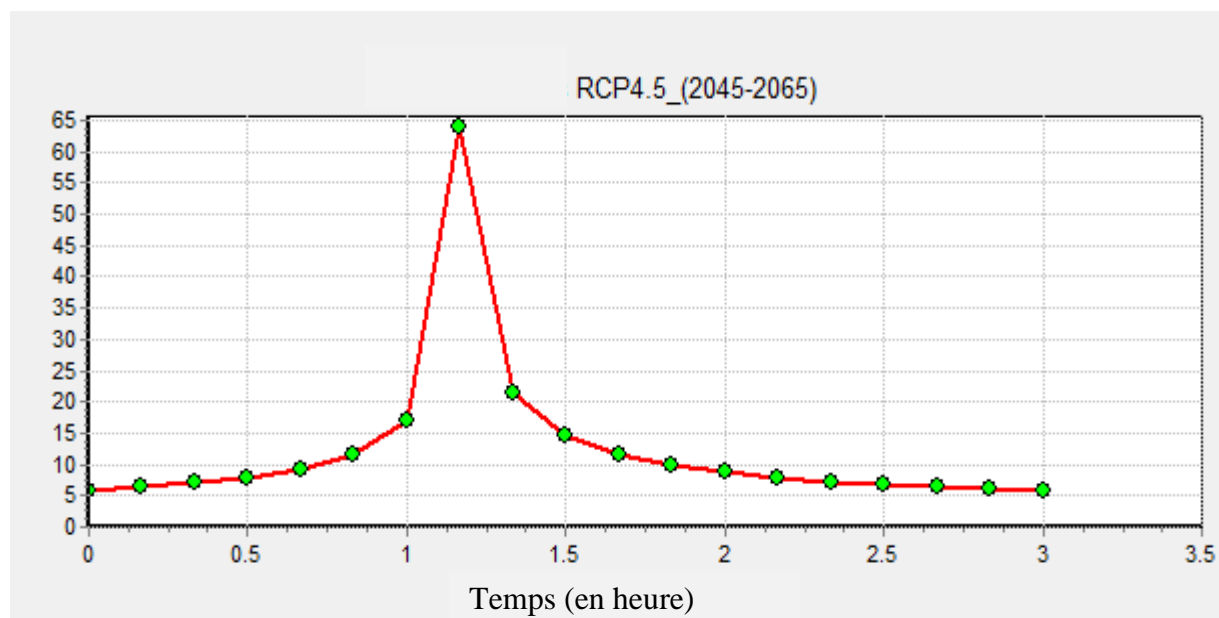


Figure 4-9 : Hyétogramme de TS3.

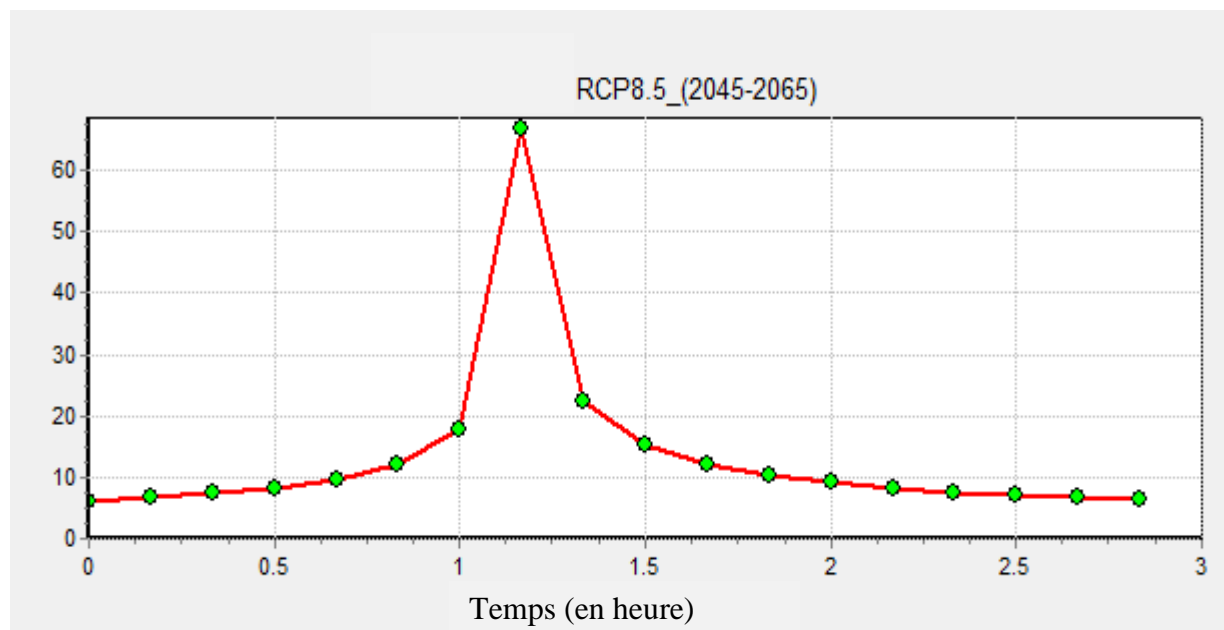


Figure 4-10 : Hyétogramme de TS4.

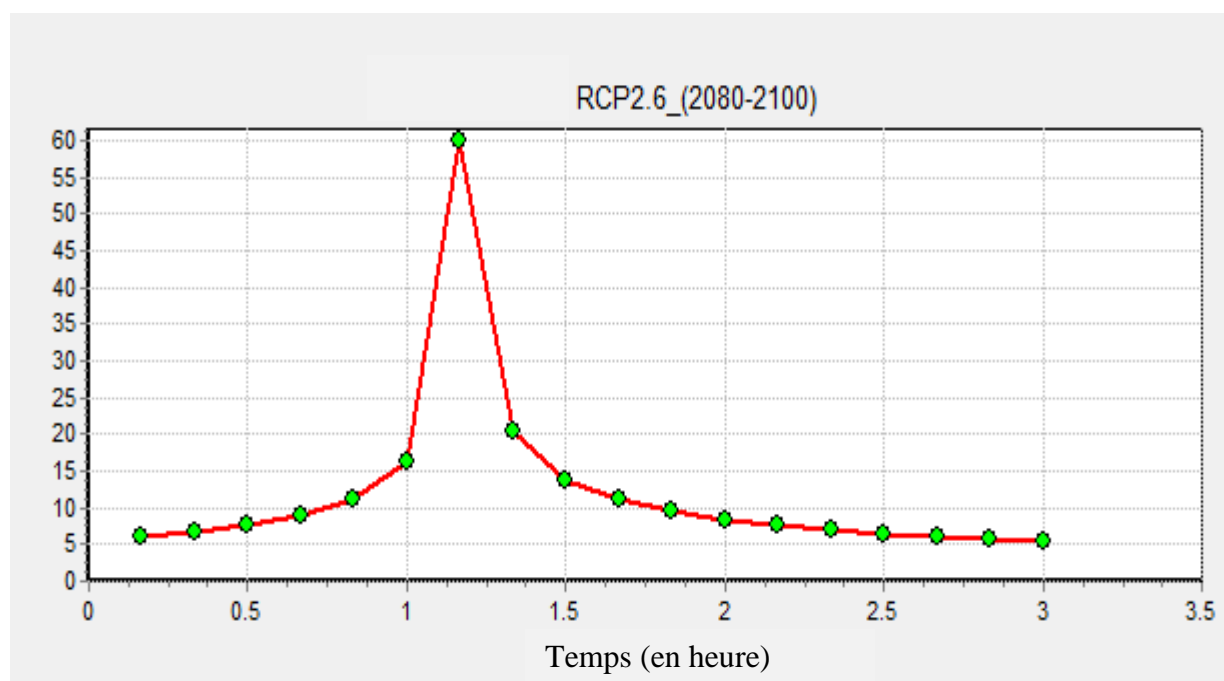


Figure 4-11 : Hyétogramme de TS5.

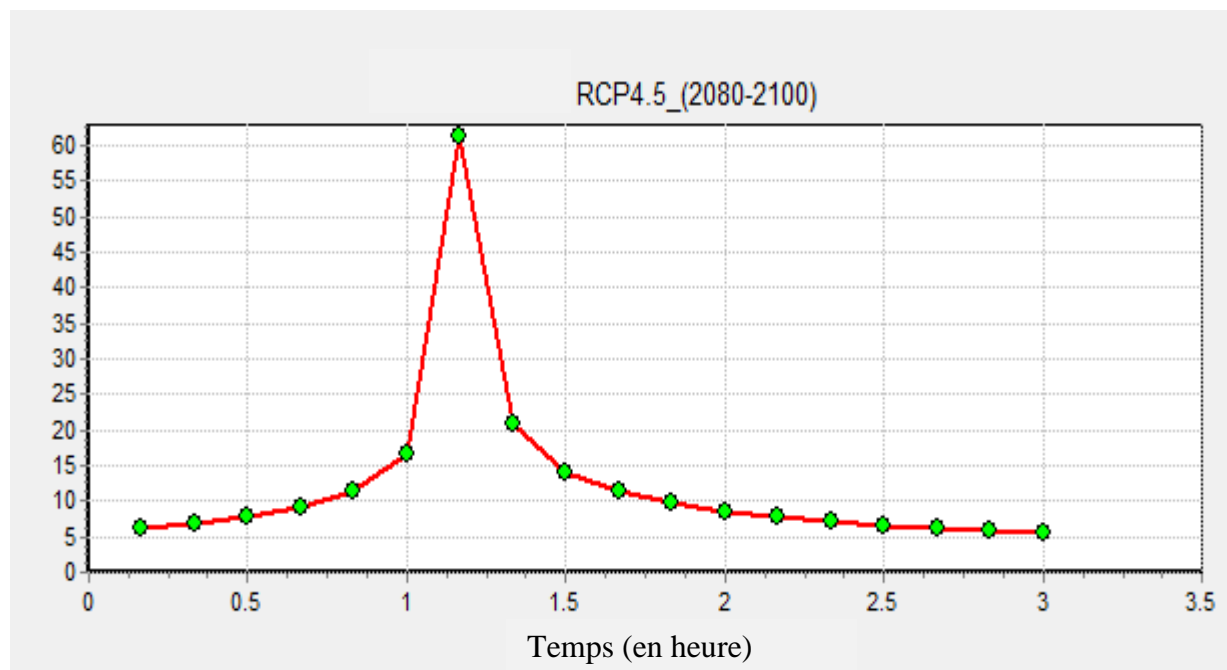


Figure 4-12 : Hyétogramme de TS6.

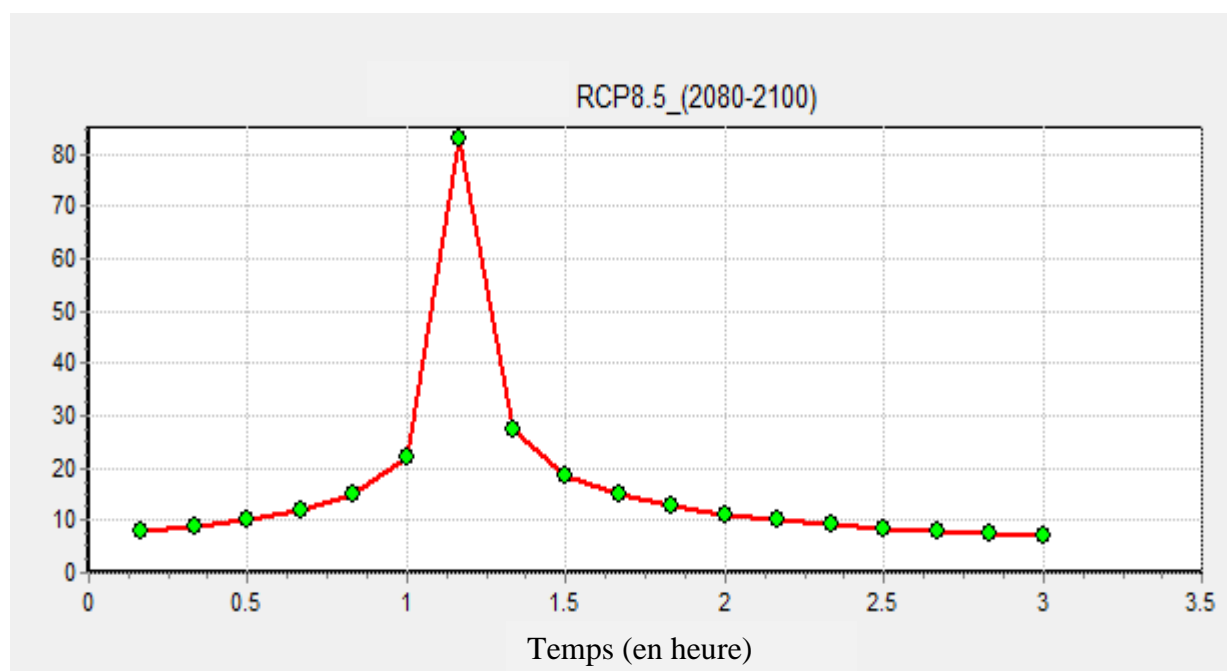


Figure 4-13 : Hyétogramme de TS7.

4.3 Modélisation du réseau de drainage

La modélisation du réseau de drainage consiste à représenter le réseau de drainage dans le logiciel SWMM5.1 en restant le plus proche possible de la réalité. Au préalable, il est nécessaire de modéliser le bassin versant et de déterminer toutes les caractéristiques nécessaires à la mise en service du réseau.

4.3.1 Modélisation du bassin versant

La modélisation du bassin versant est réalisée en deux principales étapes : une modélisation dans le logiciel Global Mapper et une modélisation dans le logiciel SWMM5.1. La modélisation dans le logiciel Global Mapper consiste d'abord à subdiviser le bassin à drainer en sous bassins ; ensuite, à déterminer les caractéristiques de chacun des sous bassins obtenus ; et enfin, à déterminer les longueurs des rues qui permettent le drainage du sous bassin. La Figure 4-14 présente la subdivision du bassin en sous bassins de drainage. Ainsi, le bassin versant est subdivisé en 385 sous bassins de drainage de moins de 10ha de superficie totale soit une moyenne de superficies obtenues de 2ha.

Pour chacun des sous bassins, les principales caractéristiques déterminées avec le logiciel Global Mapper sont essentiellement : la pente moyenne, la largeur de drainage et la superficie. En ce qui concerne l'occupation du territoire, elle est déterminée en superposant le model de terrain de la ville de Sept-Îles à la carte de la ville dans Google Earth. L'analyse de l'occupation du territoire révèle quatre types de zones rencontrées : commerciale, industrielle, résidentielle et parcs. À partir de l'analyse de l'occupation du territoire, le coefficient de ruissellement de chaque sous bassin est déterminé et présenté dans le Tableau 4-4.



Figure 4-14 : Subdivision du bassin à l'étude en sous bassins.

Tableau 4-4 : Coefficient de ruissellement relatif aux différentes zones rencontrées.

Zone	Coefficient de ruissellement
Commerciale	0.95
Industrielle	0.8
Résidentielle	0.6
Parcs, cimetières, Prairies	0.25

La modélisation du bassin versant dans le logiciel SWMM5.1 consiste à représenter les sous bassins obtenus dans ledit logiciel en y entrant toutes leurs caractéristiques. Aussi, il est nécessaire de choisir la méthode d'estimation de l'infiltration utilisée par le logiciel. Le choix s'est porté vers la méthode de Green-Ampt du fait que la littérature consultée renseigne sur les paramètres de l'équation de Green-Ampt pour les sables. Notamment, dans le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP 2010), ces paramètres sont donnés ainsi qu'une description de la méthode d'infiltration de Green-Ampt. Pour la modélisation des pertes par infiltration avec la méthode de Green-Ampt dans SWMM, les paramètres nécessaires à entrés sont la conductivité du sol, la porosité et la succion. Le présente les paramètres de l'équation de Green-Ampt retenus pour cette étude. Le réseau peut ainsi être modélisé à présent.

Tableau 4-5 : Paramètres de l'équation de Green-Ampt. (Source : MDDEFP 2010)

Type de sol	Porosité	Conductivité (cm/h)	Succion (cm)
Sable	0,437	12	4,95

4.3.2 Pré-dimensionnement par la méthode rationnelle

La modélisation du réseau de drainage nécessite un pré-dimensionnement par la méthode rationnelle en vue de déterminer les caractéristiques manquantes dans les données obtenues. Il s'agit d'une part de déterminer la pente des conduites en respectant les contraintes exigées par la profondeur d'enfouissement minimale et par les vitesses minimales et maximales. D'autre part, le pré-dimensionnement consiste à déterminer les diamètres des conduites à modifier. En effet, certaines conduites amont ont un diamètre supérieur à celui de la conduite aval. Ainsi, le réseau a été soumis à un pré-dimensionnement par la méthode rationnelle.

La méthode rationnelle est le modèle le plus simple qui permet de déterminer le débit de ruissellement maximal dans un bassin versant. À partir de ce dernier, le diamètre et la pente des conduites sont calculés en utilisant l'équation de Manning qui détermine la vitesse en fonction de la pente de la conduite (S), du rayon hydraulique (R_H) et du coefficient de Manning (η). L'équation (4.3) présente la forme de base de l'équation de Manning. En remplaçant cette équation dans l'équation du calcul du débit dans une conduite on obtient l'équation (4.4).

Enfin, les positions des radiers des jonctions sont déterminées en utilisant les pentes obtenues tout en respectant la profondeur d'enfouissement minimale (évaluer à 2m au Québec). Les équations de la méthode rationnelle et de Manning sont présentées dans les équations ci-dessous.

$$Q = KAIR \quad (4-2)$$

Avec : $K=2,75 \cdot 10^{-3}$; A = aire en ha ; I = intensité de la pluie en mm/h ; R = coefficient de ruissellement.

$$V = \frac{R_H^{2/3} S^{1/2}}{\eta} \quad (4-3)$$

$$Q = \frac{R_H^{2/3} S^{1/2} A}{\eta} \quad (4-4)$$

Avec V = vitesse d'écoulement lorsque la conduite coule à plein débit ; S = pente de la conduite ; Q = le débit lorsque la conduite coule à plein débit ; η = coefficient de Manning ; A = aire de la section mouillée ; R_H = rayon hydraulique.

La longueur de chacune des conduites est relevée via Global Mapper en mesurant la rue desservie. Toutefois, si la longueur de la rue est supérieure à 120m et que le diamètre de la conduite est inférieur à 900mm, alors cette rue est divisée en plusieurs tronçons de conduites de sorte qu'aucune d'entre elles n'excède la longueur maximale admise. Aussi, le même raisonnement est appliqué pour les conduites de diamètre supérieur à 900mm, dans ce cas la longueur de la rue est comparée 250m.

D'autre part, la profondeur d'enfouissement des conduites est calculée comme montré à l'équation (4-5). Toutefois, si le résultat obtenu est en-dessous de 2 m, la pente est réajustée de sorte qu'une profondeur minimale de 2 m soit obtenue.

$$S = \frac{H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}}{L} \quad (4-5)$$

Avec : S = pente de la conduite ; H_{amont} = côte du radier amont ; H_{aval} = côte du radier aval ; L = longueur de la conduite. Généralement, les calculs sont faits de l'exutoire vers la jonction la plus en amont du circuit de conduites. Aussi, à une jonction qui reçoit plus d'une conduite, la profondeur d'enfouissement du radier de cette jonction est la profondeur la plus basse obtenue en aval de chacune des conduites reçues.

4.3.3 Modélisation dans le logiciel SWMM5.1

La modélisation du réseau de drainage consiste à redessiner le réseau dans son ensemble dans le logiciel SWMM5.1 en y entrant toutes les caractéristiques des conduites, des jonctions et des exutoires. La Figure 4-15 présente le réseau tel que modéliser dans le logiciel. Pour les jonctions, il s'agit d'intégrer les 607 jonctions obtenues en y insérant leur hauteur maximale et la côte du radier inférieur. Les jonctions sont nommées par le symbole J suivi d'un numéro. Par exemple, la jonction numéro 45 elle sera nommée J45. Aussi, pour la modélisation, la jonction la plus en amont du sous bassin représente la jonction d'entrée du ruissellement total du sous bassin. La Figure 4-16 présente un exemple de jonction avec ses paramètres.

Pour les conduites, il s'agit d'intégrer leur diamètre, leur longueur, le type de conduite (circulaire dans le cas présent), la jonction amont et la jonction aval. Le sens d'écoulement est ainsi indiqué au logiciel. Les conduites sont supposées en béton avec un coefficient de Manning égal à 0.013.

Les conduites sont nommées par la lettre C suivie du numéro correspondant comme pour le cas des jonctions. Toutefois, la jonction J1 ne sera pas obligatoirement la jonction amont de la conduite C1. La Figure 4-17 présente un exemple de conduite avec ses paramètres.

Les exutoires sont similaires aux jonctions à la seule différence qu'il faut déterminer le niveau d'eau maximal du milieu récepteur. Dans notre étude, une première phase est réalisée avec le niveau d'eau du milieu récepteur égal à 0m, la deuxième phase est réalisée avec un niveau aval de 0,4m. Les exutoires, quant à eux, sont nommés par le terme Out suivi du numéro correspondant, soit Out1 pour le premier exutoire. La Figure 4-18 présente un exemple d'exutoire avec ses paramètres.



Figure 4-15 : Modélisation du réseau dans SWMM5.1.

Junction J75 ✕

Property	Value
Name	J75
X-Coordinate	11719.166
Y-Coordinate	2775.496
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	8.682
Max. Depth	2.32
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0

Elevation of junction's invert (m)

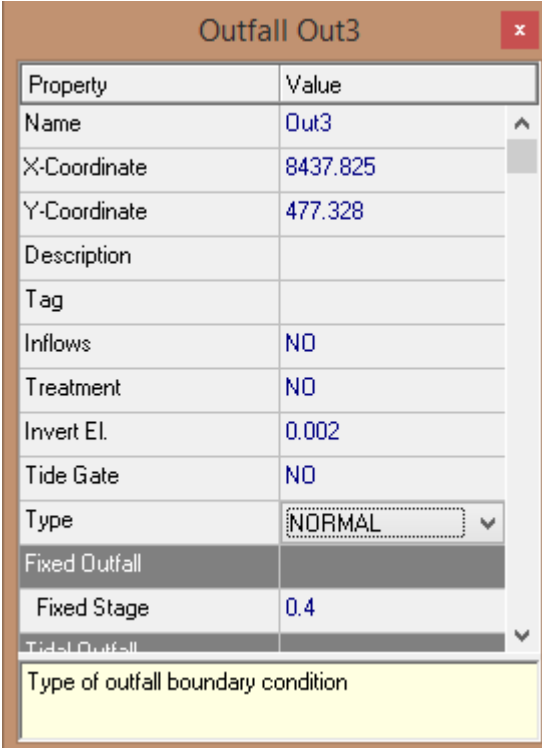
Figure 4-16 : Jonction J75 avec ses propriétés.

Conduit C12 ✕

Property	Value
Name	C12
Inlet Node	J109
Outlet Node	J114
Description	
Tag	
Shape	CIRCULAR
Max. Depth	0.610
Length	106.4
Roughness	0.013
Inlet Offset	0
Outlet Offset	0
Initial Flow	0
Maximum Flow	0

Conduit length (m)

Figure 4-17 : Conduite C12 avec ses propriétés.



Property	Value
Name	Out3
X-Coordinate	8437.825
Y-Coordinate	477.328
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	0.002
Tide Gate	NO
Type	NORMAL
Fixed Outfall	
Fixed Stage	0.4
Tidal Outfall	
Type of outfall boundary condition	

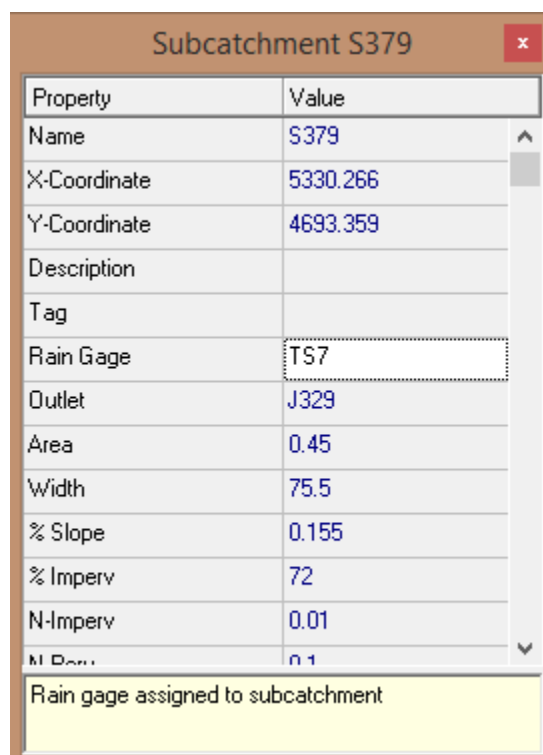
Figure 4-18 : Exutoire Out3 avec ses propriétés.

4.4 Application : gestion des eaux pluviales en climat changeant

La gestion des eaux pluviales en climat changeant consiste principalement à mettre en place des outils et méthodes qui assureront un drainage efficace des eaux lorsque le réseau est soumis au climat changeant. Ainsi, la section 4.4.1 présente la méthode de soumission du réseau sous le climat changeant. La section 4.4.2 présente la mise en place des solutions de gestion des eaux pluviales.

4.4.1 Analyse du réseau

L'analyse du réseau consiste à soumettre le réseau aux différentes pluies de projet générées à la section 4.2. Les pluies sont d'abord intégrées dans le logiciel SWMM5.1, notamment leur intensité en fonction du temps. Plus précisément, l'intensité de la pluie à chaque pas de temps est indiquée. Ensuite, les sous bassins sont soumis à chacune des pluies, une distribution uniforme de la pluie sur l'ensemble du bassin est considérée. Ainsi, le réseau soumis à chacune des pluies futures est simulé pour évaluer son état de service face à ces dernières. La Figure 4-19 montre l'exemple des propriétés d'un sous bassin lorsqu'il est soumis à une pluie future.



Property	Value
Name	S379
X-Coordinate	5330.266
Y-Coordinate	4693.359
Description	
Tag	
Rain Gage	TS7
Outlet	J329
Area	0.45
Width	75.5
% Slope	0.155
% Imperv	72
N-Imperv	0.01
M-Drop	0.1

Rain gage assigned to subcatchment

Figure 4-19 : Sous bassin S379 soumis à la pluie TS7.

Enfin, pour chacune des simulations réalisées, le réseau est analysé et les indices de performances sont relevés. Bien que l'indice de débordement permette de déterminer le nombre de débordement, il permet aussi de visualiser les jonctions où les débordements sont observés. Ces jonctions sont relevées pour un traitement futur qui est explicitement indiqué à la section 4.4.2. Les résultats de l'analyse du réseau sont présentés au Chapitre 5.

4.4.2 Mise en place des PGO

Pour cette étude, la solution de gestion des eaux pluviales en climat changeant est dirigée vers la mise en place d'une série de PGO sur le bassin versant. Les PGO utilisées sont sélectionnées en fonction des caractéristiques de la région de Sept-Îles.

Pour cette région, les PGO retenues sont constituées de pavés poreux pour les aires de stationnement, les trottoirs et les zones industrielles ; d'aménagements paysagers avec sol absorbant (jardin de pluie) pour les aires à caractère récréatif ainsi que certains trottoirs. Pour les zones résidentielles, le débranchement des gouttières est proposé. Toutefois, pour certaines aires de stationnement, une combinaison de pavés poreux et d'aménagements paysagers est proposée.

La mise en place des PGO consiste à implanter les PGO sélectionnées sur les sous bassins stratégiques déterminés à partir de l'analyse du réseau. En effet, une fois identifiées, les jonctions où les débordements sont observés sont relevées. Ensuite, les sous bassins en lien avec ces jonctions sont également analysés. Cette analyse permet de déterminer les sous bassins qui génèrent un débit de ruissellement maximal comparé aux autres sous bassin. Puis, la vérification des conditions d'installation de l'une des PGO sélectionnées est effectuée. Enfin, la mise en place de la PGO ou de la série de PGO nécessaire au secteur analysé est effectuée selon une combinaison des recommandations de l'infra-guide (CNRC 2003) et de l'étude de Fuamba et Kanyinda (2015). Les PGO sont implantées dans SWMM5.1 puis attribuées aux sous bassins prédéfinis.

Ainsi, les critères de conception des PGO ont été choisis de telle sorte que les caractéristiques des sols des PGO soient proches du sol de la région. Toutefois, pour le débranchement des gouttières, la mise en place d'une citerne est réalisée pour la récupération des eaux de pluie. La surface des PGO est définie en termes de pourcentage d'aire du sous bassin. Aussi, un pourcentage d'aire imperméable à drainer est attribué à la PGO. Le Tableau 4-6 résume les pourcentages attribués à chacun des trois PGO sélectionnées. La Figure 4-20 présente le schéma d'implantation des PGO dans le centre-ville de Sept-Îles. Les sous bassins de couleur bleue pure représentent les sous bassins qui n'ont pas reçu les PGO. Les autres couleurs représentent la fraction de l'aire du sous bassin occupée par la PGO. Les sous bassins de couleur rouge ou jaune représentent les sous bassins où une combinaison de PGO a été implantée.

Toutefois, en zone côtière, le niveau de la nappe phréatique est souvent proche de la surface du sol (à environ 1m) plus le sous bassin est proche de la ligne de côte et si le niveau moyen est proche du niveau maximal des eaux. Ainsi, les PGO affectées non loin de la ligne de côte sont les débranchements des gouttières. Plus le sous bassin n'est éloigné de la côte, moins les pavés poreux et les jardins de pluie sont implantés.

Aussi, avec une superficie moyenne de 0.5ha par sous bassin avec PGO, le Tableau 4-7 indique les coûts moyens envisagés pour l'implantation des PGO. Toutefois, les coûts d'entretien des trois types de PGO sélectionnées sont quasiment négligeables (1\$/an/m²). Ainsi, le coût d'implantation d'un système de débranchement des gouttières s'est révélé le moins cher en comparaison aux deux autres PGO. Concernant les pavés poreux, leur coût s'est révélé moins cher que les jardins de pluies

lorsque la superficie du sous bassin est d'un hectare ou moins. Au-delà d'un hectare, le coût supérieur admissible est compris dans l'intervalle des coûts des jardins de pluie.

Tableau 4-6 : Critères d'implantation des PGO.

PGO	% aire du sous bassin	% aire imperméable à drainer
Pavés poreux	50	70
Jardin de pluie	30	60
Débranchement des gouttières	30	40

Tableau 4-7 : Coûts moyens par PGO mises en place.

PGO	Coûts moyen
Pavés poreux	50 000 à 80 000 \$
Jardin de pluie	100 000 à 400 000 \$
Débranchement des gouttières	1 325 \$

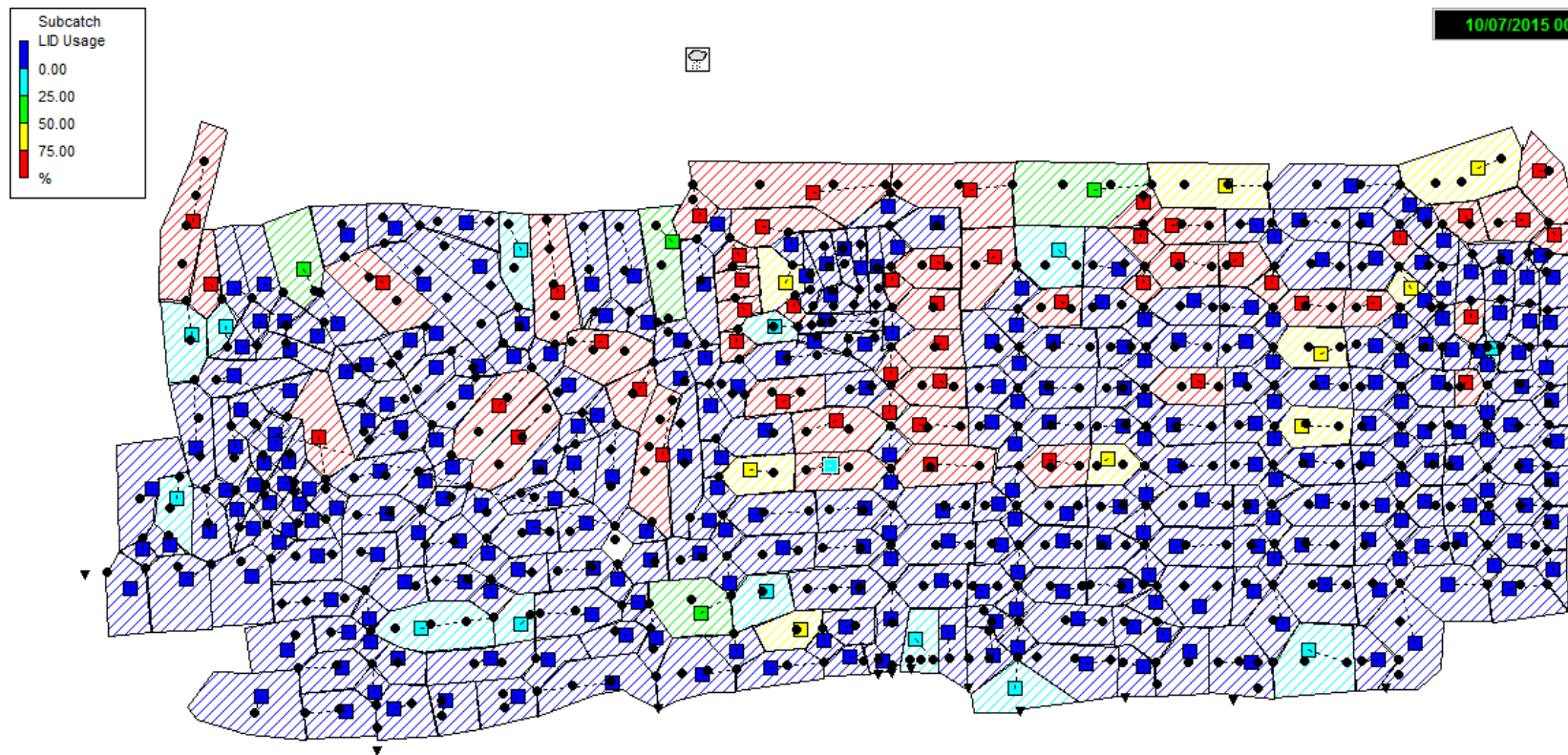


Figure 4-20 : Implantation des PGO.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le présent chapitre est divisé en trois principales sections qui permettent de présenter les résultats obtenus (section 5.1), une analyse de ces résultats (section 5.2) et une synthèse de ces résultats (section 5.3). Toutefois, l'analyse des résultats est réalisée suivant la méthodologie proposée à la section 3.2.2. Aussi, la discussion proposée se base sur tous les résultats obtenus au cours de cette étude.

5.1 Présentation des résultats

La présente section permet de présenter tous les résultats obtenus après les différentes simulations dans le logiciel SWMM5.1. Les indices de performance obtenus sont présentés pour chacun des cas simulés. Ainsi, la section 5.1.1 présente le niveau de service du réseau soumis au climat actuel, la section 5.1.2 le niveau de service du réseau soumis au climat de l'horizon 2045-2065, la section 5.1.3 les résultats obtenus lorsque le réseau est soumis au climat de l'horizon 2080-2100, et la section 5.1.4 les résultats obtenus après mise en place des mesures d'adaptation. Aussi, pour chacun des cas simulés tous les indices de performance sont considérés.

5.1.1 État de service du réseau sous le climat actuel

Dans cette section, l'état de service du réseau sous le climat actuel est présenté. Particulièrement les valeurs des différents indices de performance sont relevées. Ainsi, le Tableau 5-1 et le Tableau 5-2 présentent les résultats obtenus. Tous les indices sont relevés afin de permettre d'effectuer les différentes comparaisons prévues. Les résultats obtenus sous le climat actuel serviront de résultats de base pour l'analyse des résultats qui tient compte du climat actuel.

Tableau 5-1 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R .

I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
30	4,252	10,342	20,385

Tableau 5-2 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.

Exutoire	I_{QE} (m³/s)
Out1	4,695
Out10	3,251
Out16	0,232
Out2	2,735
Out3	3,173
Out4	1,914
Out5	0,056
Out6	2,863
Out7	0,037
Out8	5,696
Out9	4,054

Les résultats obtenus montrent que l'indice de débordement est supérieur à zéro sous le climat actuel. Il y a donc observation de débordements au niveau de trente jonctions du réseau. L'indice d'inondation renseigne sur le volume total des eaux qui ont débordé au niveau de ces jonctions. Ces débordements peuvent être expliqués par le fait qu'aucune analyse de sensibilité n'a été réalisée au cours de ce projet notamment pour la génération des pentes des conduites.

Ainsi, pour la suite de ce projet, la situation de référence correspond à l'état du réseau soumis à la pluie Pluvio1 qui représente la pluie de conception du réseau sous le climat actuel.

Quant aux indices d'infiltration et de ruissellement, ils indiquent chacun respectivement la hauteur de la lame d'eau qui s'est infiltrée dans le sol et celle de la lame d'eau qui a ruisselé pour une pluie de hauteur totale de 31,402 mm. L'indice de débit de pointe indique le débit maximal évacué à chaque exutoire.

5.1.2 État de service du réseau sous l'horizon 2045-2065

Cette section permet de présenter l'état de service du réseau sous l'horizon 2045-2065. Particulièrement les valeurs des différents indices de performance sont relevées. Ainsi, le Tableau 5-3 et le Tableau 5-4 présentent les résultats obtenus. Les résultats sont présentés en fonction de chacun des scénarios de changements climatiques représentés par chacune des pluies générées.

Tableau 5-3 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R .

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	100	6,871	12,591	24,996
TS3	113	7,44	12,96	25,751
TS4	125	8,189	13,166	26,182

Tableau 5-4 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.

Exutoire	TS2	TS3	TS4
Out1	6,378	6,564	6,766
Out10	4,11	4,194	4,307
Out16	0,257	0,257	0,257
Out2	3,283	3,321	3,369
Out3	4,111	4,171	4,289
Out4	2,597	2,738	2,803
Out5	0,056	0,056	0,056
Out6	3,696	3,765	3,846
Out7	0,054	0,055	0,057
Out8	6,697	6,791	6,884
Out9	4,575	4,62	4,687

Les résultats obtenus montrent que plus le scénario de changements climatiques est intense, plus les différents indices sont élevés. Le même constat est fait avec les hauteurs totales des pluies (voir section 4.2.2). Toutefois, les différences observées d'une pluie à une autre ne sont pas très élevées.

5.1.3 État de service du réseau sous l'horizon 2080-20100

Dans cette section, l'état de service du réseau sous l'horizon 2080-2100 est résumé. Particulièrement les valeurs des différents indices de performance sont relevées. Ainsi, le Tableau 5-5 et le Tableau 5-6 résument les résultats obtenus.

Tableau 5-5 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R .

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10^6 ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	91	6,129	11,919	23,626
TS6	95	6,495	12,186	24,173
TS7	197	14,217	16,104	32,19

Tableau 5-6 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.

Exutoire	TS5	TS6	TS7
Out1	6,206	6,316	7,606
Out10	4,051	4,115	4,95
Out16	0,256	0,256	0,256
Out2	3,236	3,269	3,456
Out3	3,997	4,133	4,818
Out4	2,48	2,542	3,45
Out5	0,056	0,056	0,057
Out6	3,644	3,697	4,285
Out7	0,106	0,101	0,108
Out8	6,602	6,654	7,226
Out9	4,752	4,79	5,044

Le même constat fait à la section 5.1.2 est obtenu dans la présente section. Toutefois, comme montré avec les résultats des pluies futures, les indices de performance du réseau soumis aux pluies futures des RCP2.6 et RCP4.5 à l'horizon 2080-2100 sont inférieurs aux indices obtenus lorsque le réseau est soumis aux pluies correspondantes à l'horizon 2045-2065.

Par ailleurs, dans ce cas de simulation, le niveau du fleuve étant augmenté de 0,4m, le réseau présente encore plus de débordements notamment sous l'influence de la pluie TS7.

5.1.4 État de service du réseau après la mise en place des PGO

Cette section permet de présenter l'évolution des différents indices de performance après la mise en place des PGO. Des comparaisons sont proposées à la section 5.2 afin de déterminer l'influence de la mise en place des PGO sur le fonctionnement du réseau.

➤ État de service du réseau sous l'horizon 2045-2065

Cette section permet de présenter l'état de service du réseau sous l'horizon 2045-2065. Particulièrement les valeurs des différents indices de performance sont relevées. Ainsi, le Tableau 5-7 et le Tableau 5-8 présentent les résultats obtenus. Ces résultats montrent qu'une grande partie de la pluie est infiltrée. En effet, les indices de ruissellement et d'infiltration ne sont pas très éloignés en termes de valeurs. Cela peut s'expliquer du fait que les PGO utilisées favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol. Ainsi, les pertes par infiltration sont plus importantes après la mise en place des PGO qui favorisent leur croissance.

Aussi, les indices, d'une pluie à une autre, ne sont pas très éloignés. En effet, les différences enregistrées entre les valeurs d'un indice d'une pluie à une autre, sont quasiment du même ordre. En exemple, l'exutoire Out1 présente un indice débit de pointe de 5,94 lorsque le réseau est soumis à la pluie TS2 ; mais sous la pluie TS3 cet indice est de 6,032. Cela montre bien que l'indice débit de pointe ne varie quasiment pas d'une pluie à une autre. Le même constat est fait pour les autres indices.

Tableau 5-7 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R .

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	24	3,916	16,631	18,825
TS3	26	4,008	17,112	19,393
TS4	29	4,031	17,389	19,718

Tableau 5-8 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.

Exutoire	TS2	TS3	TS4
Out1	5,94	6,032	6,253
Out10	3,191	3,295	3,446
Out16	0,257	0,257	0,257
Out2	2,691	2,745	2,839
Out3	3,103	3,185	3,461
Out4	2113	2,186	2,375
Out5	0	0	0
Out6	1,751	1,795	1,851
Out7	0,055	0,055	0,057
Out8	5,373	5,608	5,711
Out9	4,147	4,147	4,153

➤ État de service du réseau sous l'horizon 2080-2100

Dans cette section, l'état de service du réseau sous l'horizon 2080-2100 est résumé. Particulièrement les valeurs des différents indices de performance sont relevées. Ainsi, le Tableau 5-9 et le Tableau 5-10 présentent les résultats obtenus.

Ces résultats montrent qu'une grande partie de la pluie est infiltrée comme montré à l'horizon 2045-2065. En effet, les indices de ruissellement et d'infiltration ne sont pas très éloignés l'un de l'autre en termes de valeurs. Cela peut s'expliquer du fait que les PGO utilisées favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol. Ainsi, les pertes par infiltration sont plus importantes après la mise en place des PGO qui favorisent leur croissance.

Aussi, comme observé dans les résultats de simulation du réseau soumis à l'horizon 208-2100 sans mise en place des PGO, les indices obtenus sous les pluies TS5 et TS6 sont très éloignés de ceux obtenus sous la pluie TS7. Ainsi, l'analyse se basera particulièrement sur les résultats obtenus après simulation du réseau sous la pluie TS7.

Tableau 5-9 : Mesure des indices de performance I_D , I_F , I_I et I_R .

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	19	3,544	15,747	17,792
TS6	21	3,847	16,097	18,204
TS7	80	6,549	21,183	24,245

Tableau 5-10 : Mesure de l'indice débit de pointe à l'exutoire.

Exutoire	TS5	TS6	TS7
Out1	5,365	5,577	7,47
Out10	3,09	3,161	4,162
Out16	0,256	0,256	0,256
Out2	2,602	2,664	3,285
Out3	3,037	3,03	4,155
Out4	2,052	2,103	2,838
Out5	0,077	0,077	0,077
Out6	1,703	1,734	2,134
Out7	0,12	0,104	0,101
Out8	5149	5,3	6,538
Out9	3,932	3,985	4,929

5.2 Analyse des résultats

Cette section permet de comparer les résultats obtenus au cours des différents cas de simulation. La section 5.2.1 permet de comparer l'état de service du réseau en climat actuel à son état en climat futur avant la mise en place des PGO. La section 5.2.2 permet de comparer l'état de service du réseau en climat futur avant la mise en place des PGO à son état en climat futur après la mise en place des PGO. La section 5.2.3 permet de comparer l'état de service du réseau en climat actuel à son état en climat futur après la mise en place des PGO.

5.2.1 Comparaison climat actuel et climat futur sans PGO

Deux cas de comparaison de l'état de service du réseau sont retenus. Le cas 1 permet de comparer l'état de service du réseau soumis au climat actuel à celui du réseau soumis aux pluies de l'horizon 2045-2065. Le cas 2 permet de comparer l'état de service du réseau soumis au climat actuel et son état lorsqu'il est soumis aux pluies de l'horizon 2080-2100.

➤ Cas 1 : Climat actuel VS horizon 2045-2065

En comparant l'état du réseau en climat actuel à son état en climat futur sous l'horizon 2045-2065, on observe une augmentation de tous les indices. En effet, l'augmentation de l'intensité des précipitations entraîne ici une augmentation du nombre de débordements et une augmentation du volume d'eau qui a débordé.

Le Tableau 5-11 et le Tableau 5-12 montrent les résultats de la comparaison en valeur et en pourcentage. Il en découle que plus le RCP est grand, plus la différence est grande. En effet, la différence des indices augmente avec l'intensité de la pluie. De plus, le pourcentage d'augmentation des indices varie de 233 à 317% pour l'indice de débordements, et de 62 à 93% pour l'indice d'inondation. Ainsi, le comportement du réseau à l'horizon 2045-2065 comparé au climat actuel est caractérisé de défaillant.

Le pourcentage d'augmentation des indices est bien plus élevé que le pourcentage d'augmentation des intensités des pluies. En effet, les pluies obtenues sous l'horizon 2045-2065 présentent une augmentation de 17 à 21% en partant de la pluie TS2 jusqu'à la pluie TS4. Par contre, les indices de débordements et d'inondations présentent des augmentations respectives de 233 à 317% et de 62 à 93%. Ainsi, bien qu'il y ait une forte augmentation du nombre de jonctions qui débordent, le volume des eaux qui débordent ne suit pas la même fonction d'augmentation. En d'autres termes, le nombre de débordements peut être très grand et le volume des eaux qui débordent peut présenter des variations moins sévères.

Tableau 5-11 : Différence des valeurs à l'horizon 2045-2065 et celles du climat actuel.

Pluie	I _D (jonction)	I _F (10 ⁶ ltr)
TS2	70	2,619
TS3	83	3,188
TS4	95	3,937

Tableau 5-12 : Pourcentage d'augmentation des indices de performance.

Pluie	I _D (jonction)	I _F (10 ⁶ ltr)
TS2	233%	62%
TS3	277%	75%
TS4	317%	93%

➤ Cas 2 : Climat actuel VS horizon 2080-2100

En comparant l'état de service du réseau en climat actuel à son état de service en climat futur sous l'horizon 2080-2100, une augmentation de tous les indices est aussi observée. En effet, l'augmentation de l'intensité des précipitations entraîne ici une augmentation du nombre de débordements et une augmentation du volume d'eau qui a débordé. Le Tableau 5-13 et le Tableau 5-14 montrent les résultats de la comparaison en valeur et en pourcentage. Il en découle que plus le RCP est grand, plus la différence est grande. De plus le pourcentage d'augmentation des indices varie de 203 à 557% pour l'indice de débordements, et de 44 à 234% pour l'indice d'inondation. Ainsi, le comportement du réseau à l'horizon 2080-2100 comparé au climat actuel est caractérisé de défaillant.

Dans ce cas de comparaison, il se remarque aussi que l'indice d'inondation suit quasiment la même fonction d'augmentation que l'indice de débordements. En effet, en comparant les pourcentages d'augmentation, l'indice de débordement augmente de 203 à 557% tandis que l'indice d'inondation augmente de 44 à 234% pour des pluies qui présentent des augmentations de 16 à 35%. Toutefois, concernant les résultats obtenus après soumission du réseau aux pluies TS5 et TS7, ils ne sont pas assez représentatifs du fait des anomalies constatées lors de la génération des courbes IDF correspondantes aux scénarios de changements climatiques mis en évidence ici.

Par ailleurs, pour la pluie TS7 les augmentations des indices de débordements et d'inondation varient de sorte que l'indice de débordements représente quasiment le double de l'indice d'inondation (557 et 234%). Dans ce cas, le nombre de débordements et le volume des eaux qui débordent augmentent de la même façon. Cela peut s'expliquer du fait que le niveau du fleuve ait été augmenté de 0.4m et que l'intensité de la pluie ait aussi augmenté (35%).

Ainsi, le réseau présente de la difficulté à évacuer les eaux sous l'horizon 2080-2100. Le constat montre que quasiment cinq fois plus de débordements sont observés et le volume des eaux qui débordent augmente plus de deux fois comparé aux résultats obtenus en climat actuel.

Tableau 5-13 : Différence des valeurs à l'horizon 2080-2100 et celles du climat actuel.

Pluie	I _D (jonction)	I _F (10 ⁶ l)
TS5	61	1,877
TS6	65	2,243
TS7	167	9,965

Tableau 5-14 : Pourcentage d'augmentation des indices de performance.

Pluie	I _D	I _F
TS5	203%	44%
TS6	217%	53%
TS7	557%	234%

5.2.2 Comparaison climat futur sans PGO et climat futur avec PGO

Cette section permet de comparer le niveau de service du réseau lorsqu'il est soumis au climat futur avant et après la mise en place des PGO. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de valeurs et de pourcentage afin de mieux les analyser. Ainsi, la comparaison est d'abord faite pour l'horizon 2045-2065, ensuite pour l'horizon 2080-2100.

➤ Réseau soumis à l'horizon 2045-2065

En comparant le niveau du réseau avant et après mise en service des PGO, il se dégage une réduction importante de plusieurs indices. En effet, les indices de débordement, d'infiltration et de ruissellement présentent de fortes à de moyennes diminutions après la mise en place des PGO. Le Tableau 5-15 et le Tableau 5-16 présentent les résultats de comparaison de l'état de service du réseau avant et après la mise en place des PGO.

Les résultats montrent que les pourcentages de diminution varient de 59 à 61% pour l'indice de débordements et de 37 à 41% pour l'indice d'inondation. Quant à l'indice de ruissellement, il affiche un taux de variation constant pour les trois événements de pluies définis. Le même constat est fait pour l'indice d'infiltration bien qu'il s'agisse d'une augmentation pour ce dernier.

Ainsi, la mise en place des PGO qui favorisent l'infiltration permet d'obtenir une augmentation des pertes par infiltration de 32% et réduit ainsi le ruissellement de 25%. Cela a pour effet de réduire le nombre de débordements de 59 à 61% et le volume d'eau qui déborde de 37 à 41%.

Aussi, le taux de variation d'une pluie à une autre n'est pas très éloigné concernant les indices de débordements et d'inondation. Cela permet de prétendre que la mise en place des PGO permet de stabiliser les débordements à un nombre peu variable d'une pluie à une autre.

Toutefois, en comparant les résultats obtenus après simulation sous les pluies TS3 et TS4, il en ressort que, malgré la diminution observée du taux de l'indice de débordements (62 à 61%), le taux de l'indice d'inondation augmente toujours (39 à 41%). Cela implique la mise en place des PGO entraîne une diminution progressive du volume d'eau qui déborde sans nécessairement entraîner une diminution progressive du nombre de jonctions où sont observés les débordements.

Concernant l'indice de débit de pointe, il varie d'un exutoire à un autre pour une même pluie bien qu'il indique soit une diminution (valeur négative) soit une constante (0%). Après la mise en place des PGO, le débit de pointe à chacun des exutoires présente un taux de diminution variable. En effet, selon que le circuit en amont ait été l'objet d'une mise en place de PGO, l'indice de débit de pointe varie. Ainsi, un indice de 0% pour les exutoires Out16 et Out7 est relevé. Cela traduit alors la non mise en place de PGO pour le circuit de conduites amont à chacun de ces exutoires.

Toutefois, les exutoires Out6 et Out5 présentent de forts taux de diminution de l'indice de débit de pointe. Le but ici était de réduire le nombre de débordements observés dans le circuit de conduites amont à chacun de ces exutoires. Quant aux autres exutoires, le taux de diminution de l'indice de débit de pointe est faible. En effet, bien que les PGO mises en place contribuent à la diminution du ruissellement, l'indice de débit de pointe à l'exutoire varie légèrement comparé aux autres indices. De plus, les résultats montrent que le taux de variation de cet indice n'est en aucun cas supérieur à celui de l'indice de ruissellement pour lesdits exutoires.

Tableau 5-15 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2045-2065.

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	-59	-2.555	4,04	-6,171
TS3	-70	-2.882	4,152	-6,358
TS4	-76	-3.358	4,223	-6,464
Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	-59%	-37%	32%	-25%
TS3	-62%	-39%	32%	-25%
TS4	-61%	-41%	32%	-25%

Tableau 5-16 : Comparaison de l'indice de ruissellement avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2045-2065.

Exutoire	TS2	TS3	TS4		Exutoire	TS2	TS3	TS4
Out1	-0,438	-0,532	-0,513		Out1	-7%	-8%	-8%
Out10	-0,919	-0,899	-0,861		Out10	-22%	-21%	-20%
Out16	0	0	0		Out16	0%	0%	0%
Out2	-0,592	-0,576	-0,53		Out2	-18%	-17%	-16%
Out3	-1,008	-0,986	-0,828		Out3	-25%	-24%	-19%
Out4	-0,484	-0,552	-0,428		Out4	-19%	-20%	-15%
Out5	-0,056	-0,056	-0,056		Out5	-100%	-100%	-100%
Out6	-1,945	-1,97	-1,995		Out6	-53%	-52%	-52%
Out7	0,001	0	0		Out7	2%	0%	0%
Out8	-1,324	-1,183	-1,173		Out8	-20%	-17%	-17%
Out9	-0,428	-0,473	-0,534		Out9	-9%	-10%	-11%

➤ Réseau soumis à l'horizon 2080-2100

L'analyse de l'état de service du réseau après la mise en place des PGO à l'horizon 2080-2100 montrent des taux de variation des indices de performances quasiment identiques (pluie TS7).

Particulièrement, pour les indices de débordements et d'inondation, les taux de diminution sont du même ordre de grandeur. Cela implique que le nombre de jonctions où les débordements sont observés diminuent avec le volume d'eau qui a débordé après la mise en place des PGO. Toutefois, l'indice d'infiltration montre que les pertes par infiltration ont augmenté de 32% pour chacune des pluies. Le même constat est fait pour l'indice de ruissellement. Il en ressort que les PGO mises en place n'aient pas été modifiées au cours des différentes simulations.

Concernant l'indice de débit de pointe, de petites à de moyennes diminutions sont observées. En dehors des exutoires Out5 et Out6, le taux de diminution de l'indice de débit de pointe reste inférieur à 20%. L'indice de débit de pointe varie très peu à l'horizon 2080-2100. Toutefois, les exutoires Out6 et Out5 représentent des cas isolés. En effet, pour l'exutoire Out6, l'indice de débit de pointe varie très peu d'une pluie à une autre. Quant à l'exutoire Out5, une augmentation de l'indice de débit de pointe est observée. Cette augmentation peut être expliquée par la montée des eaux du fleuve qui est toujours estimée à 0,4m. Aussi, bien que les valeurs de leur précipitation totale possèdent des erreurs, le même constat est fait pour les pluies TS5 et TS6.

Tableau 5-17 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2080-2100.

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	-72	-2,585	3,828	-5,834
TS6	-74	-2,648	3,911	-5,969
TS7	-117	-7,668	5,079	-7,945
Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	-79%	-42%	32%	-25%
TS6	-78%	-41%	32%	-25%
TS7	-59%	-54%	32%	-25%

Tableau 5-18 : Comparaison de l'indice de ruissellement avant et après la mise en place des PGO pour l'horizon 2080-2100.

Exutoire	TS5	TS6	TS7		Exutoire	TS5	TS6	TS7
Out1	-0,841	-0,739	-0,136		Out1	-14%	-12%	-2%
Out10	-0,961	-0,954	-0,788		Out10	-24%	-23%	-16%
Out16	0	0	0		Out16	0%	0%	0%
Out2	-0,634	-0,605	-0,171		Out2	-20%	-19%	-5%
Out3	-0,96	-1,103	-0,663		Out3	-24%	-27%	-14%
Out4	-0,428	-0,439	-0,612		Out4	-17%	-17%	-18%
Out5	0,021	0,021	0,02		Out5	38%	38%	35%
Out6	-1,941	-1,963	-2,151		Out6	-53%	-53%	-50%
Out7	0,014	0,003	-0,007		Out7	13%	3%	-6%
Out8	-1,453	-1,354	-0,688		Out8	-22%	-20%	-10%
Out9	-0,82	-0,805	-0,115		Out9	-17%	-17%	-2%

5.2.3 Comparaison climat actuel et climat futur avec PGO

Il s'agit ici de comparer les résultats obtenus en climat actuel et ceux obtenus en climat futur après la mise en des PGO. Une comparaison est proposée pour chacun des horizons 2045-2065 et 2080-2100. Ces comparaisons permettent de vérifier s'il serait possible de permettre au réseau de drainage de retrouver son état de service actuel malgré qu'il soit soumis au climat changeant.

➤ Cas1 : Climat actuel VS horizon 2045-2065 avec PGO

Ce premier cas de comparaison permet de comparer les valeurs des différents indices lorsque le réseau est soumis au climat actuel et au climat changeant de l'horizon 2045-2065. D'abord, une différence des valeurs des indices est proposée, ensuite, un taux de variation est déterminé. Enfin, les valeurs sont comparées deux à deux. Le Tableau 5-19 et le Tableau 5-20 présentent les résultats obtenus.

Tableau 5-19 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R (climat actuel et horizon 2045-2065 avec PGO).

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10^6 ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	-6	-0,336	6,289	-1,56
TS3	-4	-0,244	6,77	-0,992
TS4	-1	-0,221	7,047	-0,667
Pluie	I_D (jonction)	I_F (10^6 ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS2	-25%	-9%	38%	-8%
TS3	-15%	-6%	40%	-5%
TS4	-3%	-5%	41%	-3%

Tableau 5-20 : Comparaison de l'indice de ruissellement (climat actuel et horizon 2045-2065 avec PGO).

Exutoire	TS2	TS3	TS4		Exutoire	TS2	TS3	TS4
Out1	1,245	1,337	1,558		Out1	27%	28%	33%
Out10	-0,06	0,044	0,195		Out10	-2%	1%	6%
Out16	0,025	0,025	0,025		Out16	11%	11%	11%
Out2	-0,044	0,01	0,104		Out2	-2%	0%	4%
Out3	-0,07	0,012	0,288		Out3	-2%	0%	9%
Out4	0,199	0,272	0,461		Out4	10%	14%	24%
Out5	-0,056	-0,056	-0,056		Out5	-100%	-100%	-100%
Out6	-1,112	-1,068	-1,012		Out6	-39%	-37%	-35%
Out7	0,018	0,018	0,02		Out7	49%	49%	54%
Out8	-0,323	-0,088	0,015		Out8	-6%	-2%	0%
Out9	0,093	0,093	0,099		Out9	2%	2%	2%

Il en découle de ces résultats que les indices de débordements, d'inondation et de ruissellement présentent des taux de diminution qui varient de 3 à 25%. Par contre l'indice d'infiltration présente un taux moyen d'augmentation autour de 40%. Cela traduit en quelque sorte le fait que les PGO

mises en place favorisent l'infiltration et diminuent le ruissellement afin de réduire le nombre de débordements ainsi que le volume d'eau qui déborde. L'observation de ces résultats permet d'affirmer que la mise en place des PGO à l'horizon 2045-2065 assure un retour de l'état initial du réseau.

Par ailleurs, les résultats de l'indice de débit de pointe montrent des variations d'un exutoire à un autre pour une même pluie. Ainsi, il se dégage soit des augmentations (indice négatif), soit des diminutions (indice positif). Ces variations s'expliquent par la méthode de mise en place des PGO sur le bassin versant. En effet, les PGO ont été mises en place en considérant les circuits de conduites où est observé le plus grand nombre de débordements. De ce fait, il est évident d'observer des augmentations des débits de pointe au niveau de certains exutoires dont le circuit de conduites associé n'ait subi aucun changement. Pour les autres exutoires, la diminution de l'indice de débit de pointe montre bien que le circuit de conduites associé à chacun de ces exutoires ait reçu un ou plusieurs PGO comme solution aux débordements observés.

➤ Cas2 : Climat actuel VS horizon 2080-2100 avec PGO

Dans cette section, l'état de service du réseau à l'horizon 2080-2100 après mise en place des PGO est comparé à son état de service en climat actuel. Les différents indices de performance sont comparés. Un accent est plus porté sur la comparaison des résultats obtenus après simulation sous la pluie TS7 et sous le climat actuel. Comme expliqué auparavant, les résultats obtenus après simulation sous les pluies TS5 et TS6 ne sont quasiment pas considérés. Le Tableau 5-21 et le Tableau 5-22 présentent les résultats de comparaison des différents indices.

Les résultats montrent une augmentation des différents indices dont le plus élevé est l'indice de débordements et le moins élevés, l'indice de ruissellement. Pour une différence de pluie de près de 55%, l'indice de ruissellement présente une augmentation de 16% pour l'horizon 2080-2100 après la mise en place des PGO. Par contre, l'indice d'infiltration présente une augmentation de près de 51%. Cela montre que malgré les augmentations des indices d'inondation et de débordements, les PGO mises en place contribuent à l'augmentation des pertes par infiltration.

Concernant l'indice de ruissellement, les résultats montrent une légère diminution à l'exutoire Out6. Toutefois, les dix autres exutoires présentent une augmentation moyenne de l'indice de débit de pointe, en dehors de l'exutoire Out7. Cela permet de mettre en évidence que la série de PGO

intégrée dans le circuit de conduites en amont à l'exutoire Out6 permet à ce tronçon du réseau de réintégré son état de service initial.

Tableau 5-21 : Comparaison des indices I_D , I_F , I_I et I_R (climat actuel et horizon 2080-2100 avec PGO).

Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	-11	-0,708	5,405	-2,593
TS6	-9	-0,405	5,755	-2,181
TS7	50	2,297	10,841	3,86
Pluie	I_D (jonction)	I_F (10 ⁶ ltr)	I_I (mm)	I_R (mm)
TS5	-58%	-20%	34%	-15%
TS6	-43%	-11%	36%	-12%
TS7	63%	35%	51%	16%

Tableau 5-22 : Comparaison de l'indice de ruissellement (climat actuel et horizon 2080-2100 avec PGO).

Exutoire	TS5	TS6	TS7		Exutoire	TS5	TS6	TS7
Out1	0,67	0,882	2,775		Out1	14%	19%	59%
Out10	-0,161	-0,09	0,911		Out10	-5%	-3%	28%
Out16	0,024	0,024	0,024		Out16	10%	10%	10%
Out2	-0,133	-0,071	0,55		Out2	-5%	-3%	20%
Out3	-0,136	-0,143	0,982		Out3	-4%	-5%	31%
Out4	0,138	0,189	0,924		Out4	7%	10%	48%
Out5	0,021	0,021	0,021		Out5	38%	38%	38%
Out6	-1,16	-1,129	-0,729		Out6	-41%	-39%	-25%
Out7	0,083	0,067	0,064		Out7	224%	181%	173%
Out8	-0,547	-0,396	0,842		Out8	-10%	-7%	15%
Out9	-0,122	-0,069	0,875		Out9	-3%	-2%	22%

5.3 Synthèse des résultats

Cette section présente la synthèse des résultats obtenus. Le Tableau 5-23 et le Tableau 5-24 récapitulent les résultats obtenus en climat actuel et en climat futur. Uniquement les résultats obtenus en considérant le scénario de changements climatiques RCP8.5 sont présentés.

Tableau 5-23 : Synthèse des indices de performance sous le RCP8.5.

Climat	Actuel	2045-2065		2080-2100	
Indice	(référence)	Sans PGO	Avec PGO	Sans PGO	Avec PGO
I _D (jonction)	30	125	29	197	80
I _F (10 ⁶ ltr)	4,252	8,189	4,031	14,217	6,549
I _I (mm)	10,342	13,166	17,389	16,104	21,183
I _R (mm)	20,385	26,182	19,718	32,19	24,245

Tableau 5-24 : Taux de variation des indices en comparaison au climat actuel.

Climat	2045-2065		2080-2100	
Indice	Sans PGO	Avec PGO	Sans PGO	Avec PGO
I _D (jonction)	317%	-3%	557%	167%
I _F (10 ⁶ ltr)	93%	-5%	234%	54%
I _I (mm)	27%	68%	56%	105%
I _R (mm)	28%	-3%	58%	19%

Tableau 5-25 : Différences entre hauteur des précipitations en climat actuel et futur.

Climat	Actuel	2045-2065	2080-2100
Hauteur de pluie (mm)	31,402	39,976	48,896
Hauteur de pluie (%)		27%	56%

Au sortir de l'analyse des résultats, il en découle que le réseau de drainage ne peut assurer sa fonction principale en climat futur. En effet, après comparaison de l'état de service du réseau entre le climat actuel et le climat futur avant la mise en place des PGO, les indices d'inondation et de débordements ont révélé des augmentations de plus de 150% en moyenne pour l'indice d'inondation et de 400% en moyenne pour l'indice de débordement. Plus la période future est éloignée, plus le nombre de débordements observés est grand ainsi que le volume d'eau qui déborde. Ce constat est plus accentué pour la pluie TS7 qui représente la pluie générée à l'horizon 2080-2100 sous le RCP8.5. Les impacts des changements climatiques sur le réseau de drainage se traduisent par une augmentation du nombre de débordements observés et une augmentation du volume d'eau qui déborde. Le réseau s'est révélé inapte à drainer les eaux pluviales un climat changeant. Ainsi, la problématique d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques est vérifiée.

Concernant les impacts des changements climatiques sur les précipitations, pour chacune des périodes étudiées, les précipitations augmentent avec le RCP. Plus la période future est lointaine, plus le pourcentage d'augmentation du volume total des précipitations est élevé. Toutefois, une discordance s'est révélée concernant la génération des pluies à l'horizon 2080-2100 avec les scénarios RCP2.6 et RCP4.5. En effet, le modèle a généré dans ces deux cas des intensités de précipitation moins élevées que celles produites à l'horizon 2045-2065 avec les mêmes scénarios. Cette discordance peut être expliquée par le fait que les prévisions de changements climatiques, en termes d'émissions de GES, sont moins élevées pour les RCP2.6 et 4.5 à l'horizon 2080-2100 en comparaison aux prévisions de 2045-2065 pour les mêmes RCP.

Après la mise en place des PGO dans le système de drainage, les résultats obtenus laissent entrevoir que le réseau de drainage est capable de retrouver un meilleur état de service en climat futur. En effet, la comparaison de l'état de service du réseau après la mise en place des PGO versus le réseau sans PGO en climat changeant révèle de forte diminution des indices de débordements et d'inondation. Une forte diminution du nombre de débordements est alors relevée. Toutefois, il se dégage que plus la période future est éloignée, plus l'indice d'infiltration augmente mais les taux de diminution des autres indices varient dans l'ordre décroissant d'une pluie à une autre. En comparant les résultats de chaque RCP pour différentes périodes futures, il se dégage que le même constat est fait pour le RCP8.5 et l'inverse est observé pour les deux autres RCP.

L'analyse des résultats du climat futur après mise en place des PGO versus le climat actuel révèle qu'il soit possible que le réseau retrouve son état de service actuel en climat changeant. Les taux de diminution obtenus semblent pouvoir être encore améliorés en rajoutant des PGO sur les circuits de conduites qui n'ont pas été modifiés. Toutefois, pour l'horizon 2080-2100, une atténuation des augmentations des indices est observée.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Au sortir de ce projet, les impacts des changements climatiques ont été déterminés tant pour les précipitations que pour le réseau de drainage. Concernant les précipitations, les hauteurs totales présentent une augmentation qui atteint jusqu'à 56% de plus par rapport à la hauteur totale de la pluie en climat actuel (pluie de référence). La répercussion de cette augmentation des hauteurs de pluie sur le réseau entraîne une augmentation du nombre de débordements (jusqu'à 500%). Le réseau présente ainsi une incapacité à drainer les eaux de ruissellement en climat changeant.

La mise en place des PGO présente une des meilleures solutions d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques dans un contexte de drainage des eaux urbaines. Bien que les PGO de type débranchement des gouttières et pavés poreux se soient révélées meilleures pour les zones côtières en climat nordique, les PGO de types aménagements paysagers peuvent être aussi envisagées et ont révélé de bons résultats au cours de ce projet.

Après la mise de ces différentes pratiques, une amélioration du nombre de débordements observés est obtenue. En effet, à l'horizon 2045-2065, le nombre de débordements qui augmentait de plus de 300% par rapport au climat actuel est diminué de 3% après la mise en place des PGO. Pour l'horizon 2080-2100, l'augmentation du nombre de débordements passe de 550% à 160% environ. Ces chiffres peuvent être améliorés en optimisant le nombre de PGO sur le bassin.

Toutefois, le choix des PGO a été dirigé par les contraintes du site d'implantation et les coûts d'implantation. Ces derniers ont montré que le débranchement des gouttières présentait les plus petits coûts d'implantation, suivi des PGO de type pavés poreux pour les sous bassins d'un hectare et moins. Aussi, le niveau de la nappe phréatique pour les sous bassins proches de la ligne de côte limite la mise en place des PGO de type pavé poreux qui requiert une distance minimale de 2 m de la nappe.

La présente étude permet d'établir une méthodologie de mise en place des PGO comme solution d'adaptation des zones côtières aux changements climatiques. Particulièrement, elle trouve son originalité en montrant la faisabilité de la mise en place des pratiques de gestion optimales de type contrôle à la source comme mesures d'adaptation aux impacts des changements climatiques en zones côtières. Aussi, cette étude a permis de produire une méthodologie de production des pluies de projets en climat futur, particulièrement pour la ville de Sept-Îles.

Aussi, plusieurs recommandations sont proposées pour une meilleure analyse des apports des PGO en climat changeant en zones côtières. Notamment, une analyse de sensibilité de l'outil IDF_CC afin de valider le choix du modèle climatique ; comparer les résultats obtenus avec ceux du modèle canadien, faire une étude coûts versus conséquences pour déterminer la rentabilité des PGO en climat futur. Pour un élargissement de l'éventail des PGO, une étude qui porte sur la faisabilité de la mise des PGO de type contrôle en réseau et/ou en fin de réseau est recommandée. Le développement d'une interface qui liera l'outil IDF_CC et le logiciel Aqua IDF est aussi classé parmi les recommandations proposées.

BIBLIOGRAPHIE

- ANU-CCI, Ed. (2011). Biennial Report 2009-2010, The Australian National University (ANU)The ANU Climate Change Institute (CCI).
- Beniston, Martin. (2009). Changements climatiques et impacts : De l'échelle globale à l'échelle locale. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes. 247p.
- Bennis, S., J. Bengassem, et P. Lamarre, (2003). Hydraulic Performance Index of a Sewer Network. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(7) : 504-510.
- Bizec, René-François. (2006). Gaz à effet de serre & changement climatique : Quantification et instruments de lutte contre les émissions. France. 174p.
- Brière, F. G. (2012). Distribution et collecte des eaux 3ème éd. Montréal, Presses internationales Polytechnique. 597p.
- CCmaC. (2014). Modèles. Consulté le 8 mars 2014, dans www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?long=Fr&n=4A642EDE-1.
- CNRC (2003). Contrôles à la source et sur le terrain des réseaux de drainage municipaux. Guide national pour des infrastructures municipales durables. FCM&CNRC. Canada. 3 : 51p.
- CNRM. (2010). ARPEGE-Climat. Consulté le 8 mars 2014, dans <http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article124>.
- Daynou, M. et M. Fuamba (2007). Fréquence de débordement et performance des réseaux de drainage urbain. Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie. GRAIE. Lyon-France : 981-988.
- Drejza, Susan. (2010). Impacts et efficacité des zonages des risques côtiers dans un contexte de changements climatiques : exemple de Percé, Québec. Faculté des sciences humaines - Département de géographie. Mémoire de maîtrise. Montréal, Université du Québec à Montréal : 171p.
- Environnement. (2008). Guide bâtiments durables. Consulté le 11 novembre 2015, dans <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be/fr/g-wat01-gerer-les-eauxpluviales-sur-la-parcelle.html?IDC=114&IDD=5753>.
- Field, Richard, S. Daniel, et A. Tafuri. (2004). Management of combined sewer overflows, August 2, 2004 by CRC Press. 272p.
- Fuamba, M, M. D. Thomas Walliser, Jean Rouselle, et Gilles Rivard. (2010). Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : une étude de cas pour le Québec. *Revue canadienne de génie civil*, les presses scientifiques du CNRC. 37 : 224-235.
- Fuamba, Musandji. (2011). Pratiques de gestion durable et optimale des eaux pluviales dans le drainage urbain au Canada. Conférence. Agadir, Maroc : 76p.
- Fuamba, M. et R. Kanyinda (2014). Critères de conception des pratiques de gestion optimale. Note technique. Montréal : 36p.

- Géhéniau, N. (2014). Évaluation expérimentale de la performance d'un jardin de pluie et d'un toit vert en climat froid. Mémoire de maîtrise. Génies Civil, Géologique et Mines. Montréal, École Polytechnique de Montréal : 128p.
- GIEC-GT1 (2001). Bilan 2001 de l'évolution du climat : Les éléments scientifiques - Résumé à l'intention des décideurs. Suisse : 92p.
- GIEC-GT1 (2013). Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques - Résumé à l'intention des décideurs. Suisse : 27p.
- Google. (2015). Données cartographiques. Consulté le 10 novembre 2015, dans <https://www.google.com/maps/place/Sept-%C3%8Eles,+QC,+Canada/@50.2120208,-66.402057,4141m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x4c91de48efd48999:0xe842563acc1952b6>.
- Gouvernement du Canada. (2013). Les sols de la région de Sept-Îles. Consulté le 01 Novembre 2015, dans <http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pq50/index.html>.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Mailhot, Alain, S. Bolduc, S. Duchesne, et J.-P. Villeneuve. (2008). Adaptation aux changements climatiques (cc) en matière de drainage urbain au Québec : revue de littérature et analyse critique des mesures de contrôle à la source : version finale, INRS-ETE.
- Mailhot, Alain, S. Duchesne, D. Caya, et G. Talbot. (2007). Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). Journal of Hydrology : 197-210.
- Mailhot, Alain, G. Panthou, et G. Talbot. (2014). Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec PHASE II. Québec.
- Mailhot, Alain, S. D. Samuel Bolduc, et Jean-Pierre Villeneuve. (2008a). Adaptation aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec : Revue de la littérature et analyse critique des mesures de contrôle à la source. Version finale. Montréal, INRS-ETE. R-972 : 133p.
- Mailhot, Alain, C. L. Sophie Duchesne, Geneviève Pelletier, Samuel Bolduc, Frédéric Rondeau, Ahmadi Kingumbi, et Guillaume Talbot. (2008b). Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. Québec, INRS-ETE - OURANOS - Université Laval. R-920.
- MDDEFP (1989). Directive 004 - Réseaux d'égout. Québec.
- MDDEFP (2010). Guide de gestion des eaux pluviales. Québec.
- MDDEFP (2010). Les pratiques de gestion optimale des eaux pluviales. Guide de gestion des eaux pluviales. Québec : chapitre 11 :1-90.
- Michel, V. G., H. Ducan, M. Inman, M. Rahilly, J. Stewart, A. Vieritz, P. Holt, A. Grant, T. D. Fletcher, J. Coleman, S. Maheepala, A. Sharma, A. Deletic, et P. Breen. (2007). State of

- the art review of integrated urban water models. Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie. GRAIE. Lyon-France. 1 : 507-514.
- Ministère de l'Environnement et des Gouvernements Locaux (MEGL). Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick. Environnement. Nouveau Brunswick : 15p.
- Prudhomme, C., N. Reynard, et S. Crooks. (2002). Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? Hydrological Processes 16(6) : 1137-1150.
- Rivard, Gilles. (2005). Gestion des eaux pluviales en milieu urbain - Concepts et applications. Québec, Alias communication design inc. 329p.
- Savard, J.-P. et A. Bourque (2010). Adapter les zones côtières aux changements climatiques : de la consultation à l'action. European Journal of Environmental and Civil Engineering 14(2): 219-232.
- Sirastav, Roshan K., Andre Schardong, et Slobodan P. Simonovic. (2015). Computerized tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate. London, Ontario, Canada, the University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering. v.1.2: 52p.
- Southern Pacific Sands. (2015). Southern Pacific Sands, Quality Sands. Consulté le 11 novembre 2015, dans <http://www.spsands.com.au/products/bio-retention/>.
- Vidil, Christophe. (2012). Gestion des eaux pluviales et changements climatiques : Étude de deux secteurs urbains. Mémoire de maîtrise. Département de Génie Civil et de Génie des Eaux Québec, Faculté des sciences et de génie, Université Laval : 201p.
- Ville de Sept-Îles. (2015). Consulté le 11 novembre 2015, dans http://www.ville.septiles.qc.ca/fr/carte-de-la-ville_104/.
- WG1-IPCC (2007). Climate Change 2007: The physical science basis - Summary for policy makers. Geneva, Switzerland : 18p.

ANNEXE A – MISE EN COMPARAISON DE L'OUTIL IDF_CC

La mise en comparaison de l'outil IDF_CC consiste à comparer les résultats obtenus avec l'outil et ceux obtenus en considérant la majoration proposée par Mailhot et al. (2014). Il s'agit donc de comparer les intensités des pluies futures générées à partir de l'outil IDF_CC et celles obtenues en appliquant le coefficient recommandé pour la zone de Sept-Îles.

D'après Mailhot et al. (2014), les courbes IDF de la zone de Sept-Îles doivent être majorées de 18%. En effet, d'après le tableau 2-4 repris ci-après, la ville de Sept-Îles étant dans la région C se recommande une augmentation de 18% à l'horizon 2040-2070. Le tableau A2 montre les résultats obtenus pour chacune des méthodes. Uniquement l'intensité de pointe est comparée.

Tableau A1 : Majoration recommandées pour les diverses régions du Québec à l'horizon 2050.
(Source : Mailhot et al. 2014)

Région	Augmentation recommandée
A - Région au nord du 55° N	18%
B - Région comprise entre le 51° N et le 55° N	18%
C - Estuaire du St-Laurent	18%
D - Région ouest du Québec au sud du 51° N)	18%
E - Région sud du Québec	20%

Tableau A2 : Comparaison des Méthodes de génération de courbes IDF.

Méthodes	Outil IDF_CC			Majoration de 18%
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	
Intensité (mm/h)	65.53	63.25	70.39	55.32

Il ressort de ce tableau que l'outil IDF_CC produit des pluies futures plus intenses que la majoration proposée par Mailhot et al. (2014). Aussi, l'outil tient compte des différents scénarios de changements climatiques disponibles. Ainsi, pour rester conservateur, il convient d'utiliser l'outil IDF_CC.

Toutefois, une étude de sensibilité de l'outil est recommandée pour justifier les résultats obtenus sous le scénario RCP4.5 comparé au RCP2.6.

ANNEXE B – PRÉSENTATION DE L'OUTIL IDF_CC

L'outil IDF_CC est un outil qui permet d'intégrer les impacts des changements climatiques dans la gestion des eaux pluviales. Il permet de générer facilement les courbes IDF correspondant à une région donnée pour n'importe quelle période future jusqu'à 2100. L'outil est développé à l'aide de quatre principaux algorithmes : un algorithme d'analyse statistique, un algorithme d'optimisation, un algorithme de sélection du MCG et un algorithme générant les courbes IDF.

➤ Algorithme d'analyse statique

Une analyse statistique est réalisée pour appliquer une même distribution de probabilité tant pour les données historiques que pour les données futures afin de produire les précipitations maximales annuelles (en anglais AMP). La distribution de Gumbel est utilisée comme fonction de distribution. Ainsi, pour les extrêmes annuels, la loi de distribution est exprimée comme suit :

$$Q_t = \mu + K_T \sigma \quad (\text{B} - 1)$$

Où : Q_t = valeur de dépassement ; μ = moyenne de la population ; σ = écart-type standard ; T représente la période de retour.

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \quad (\text{B} - 2)$$

Les paramètres μ et σ sont estimés à l'aide de la méthode des moments comme montré dans les équations (B – 3) et (B – 4).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (\text{B} - 3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (\text{B} - 4)$$

Compte tenu que la taille des échelles spatiales des MGC est souvent autour de 1.5°x1.5°, les données font l'objet d'une interpolation spatiale réalisée à l'aide de la méthode des distances carrées inverses. L'équation (B – 5) présente l'équation générale de cette méthode.

$$w_i = \frac{1/d_i^2}{\sum_{j=1}^k 1/d_j^2} \quad (\text{B} - 5)$$

Où d_i = est la distance entre le $i^{\text{ème}}$ point de la grille du MGC et la station ; k = le nombre de point les plus proches dans une grille ($k = 4$ dans l'outil IDF_CC).

➤ **Algorithme de sélection du modèle climatique**

L'outil IDF_CC utilise un algorithme mis en place à partir de la méthode du quantile de régression basé sur l'attribution de score de compétence (QRSS) développée par Sirastav et Simonovic (2014) pour la sélection et/ou le classement des modèles climatiques pour chacune des stations étudiées. Le lecteur est invité à consulter le manuel technique (Sirastav 2015) pour les détails mathématiques de cet algorithme.

➤ **Algorithme de génération des courbes IDF pour le climat futur**

La figure B1 présente l'algorithme développé par Sirastav et al. (2015) pour la génération des courbes IDF en climat futur. L'outil IDF_CC est ainsi le résultat de l'application de cet algorithme. L'algorithme des quantiles équidistants correspondants (EQM) est l'élément de base de l'algorithme utilisé par l'outil. Le lecteur est invité à consulter le manuel technique (Sirastav 2015) pour les détails mathématiques de cet algorithme.

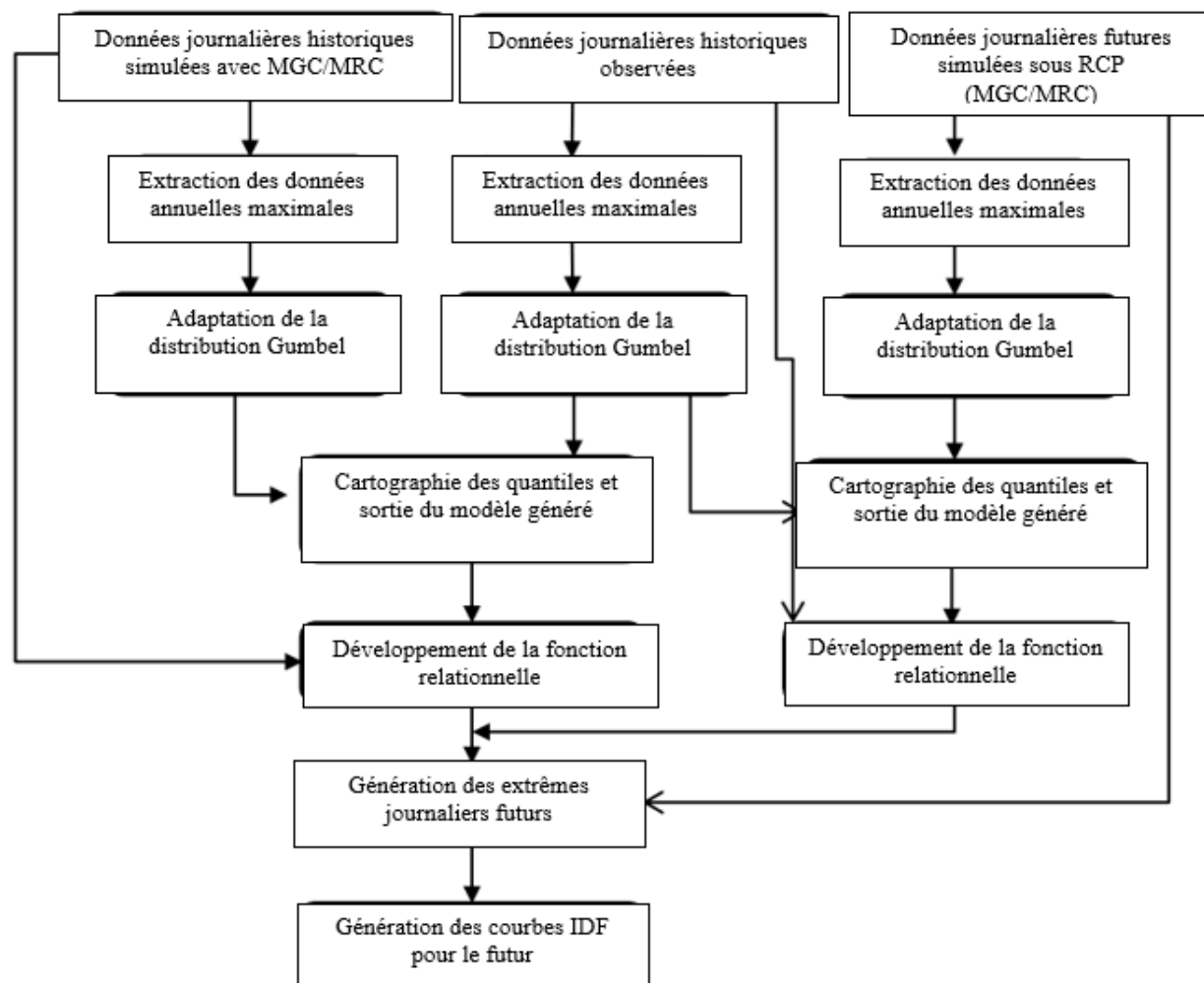


Figure B1 : Schéma de la génération des courbes IDF sous les changements climatiques.

ANNEXE C – LES DIFFÉRENTS TYPES DE PLUIES DE PROJET

Avec l'évolution de l'outil informatique, les hydrologues ont mis en place différents types de pluies de projet afin de faciliter la simulation des pluies réelles dont la prédiction et l'analyse du ruissellement sont requis pour la gestion des eaux pluviales dans un bassin versant. Ces différents types de pluies peuvent regrouper en deux catégories distinctes : les pluies historiques et les pluies synthétiques.

Les pluies historiques sont caractérisées par des précipitations qui possèdent les plus critiques en rapport avec le ruissellement parmi l'ensemble des précipitations d'une région. Les pluies synthétiques, par contre, peuvent être subdivisées en deux sous catégories (Brière 2012) :

La première catégorie est constituée de pluies dérivées d'une courbe IDF avec une distribution temporelle plus ou moins arbitraire ;

La deuxième catégorie est constituée de pluies dont la distribution temporelle est dérivée à partir de l'analyse des pluies réelles.

Par ailleurs, pour la gestion des eaux pluviales, les pluies de projets les plus utilisées sont les pluies de type synthétique constituées de pluies dérivées d'une courbe IDF. Ainsi, plusieurs méthodes de dérivation des courbes IDF pour la production des pluies de projets sont disponibles dans la littérature. Chaque type de pluie de projet qui découle d'une méthode donnée porte le nom de cette dernière. Parmi cet éventail de pluies disponibles, les plus fréquemment employées sont : la pluie de type Chicago, la pluie du SAE, la pluie du NRCS (anciennement SCS).

Particulièrement, la pluie de type Chicago est une pluie obtenue à partir de la méthode de dérivation de Chicago mise en place en 1957 (Brière 2012). Cette méthode utilise comme hypothèse de base le fait que chaque point de l'hyétogramme synthétique est associé à la même période de retour que la pluie totale (MDDEFP 2010). La figure C1 présente la distribution temporelle pour la pluie de type Chicago.

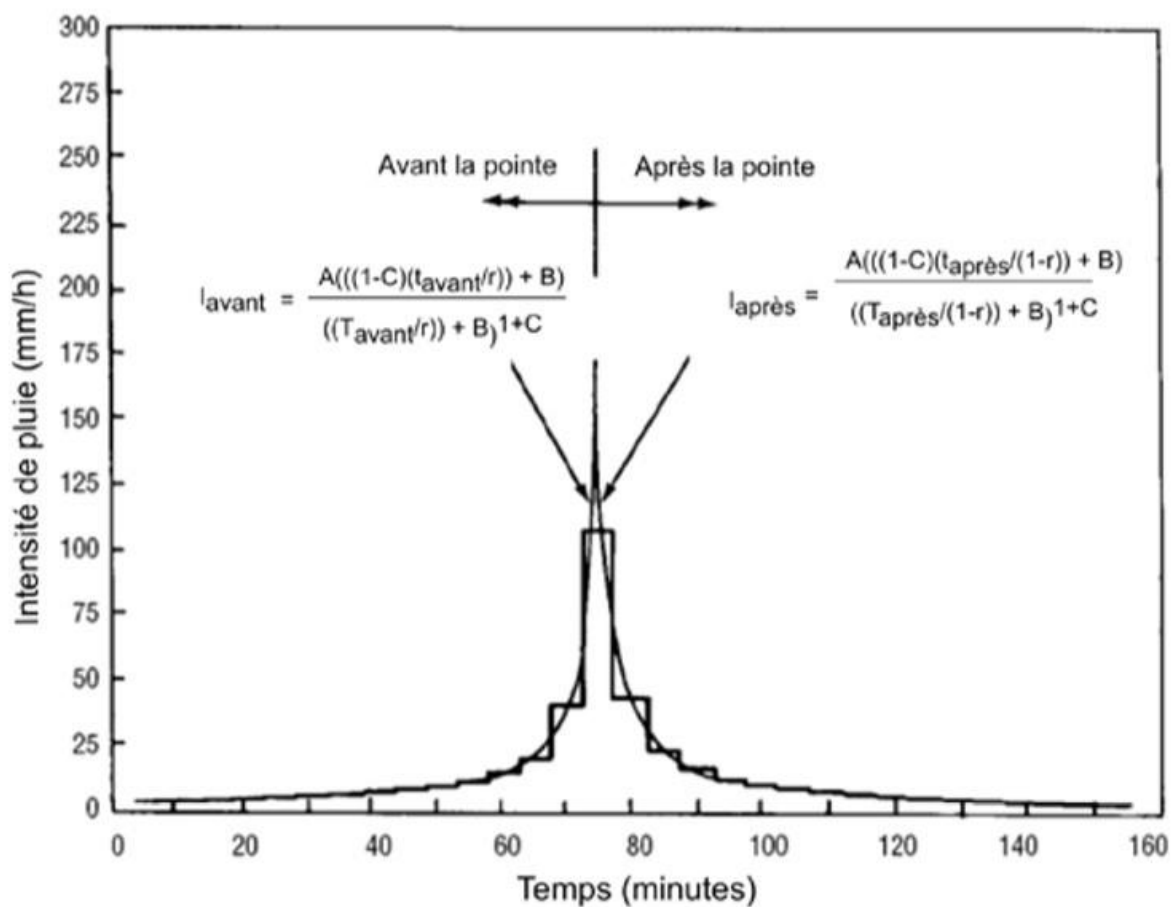


Figure C1 : Distribution temporelle pour la pluie de type Chicago. (Source : MDDEFP 2010).